



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

UTILIZAÇÃO DA INTERFEROMETRIA DE MOIRÉ NO ESTUDO DE TENSÕES DINÂMICAS EM DISCOS FLEXÍVEIS.

VITOR MAZZETI FILHO

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2004

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
DESENVOLVIMENTO DE COLEÇÕES

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por **VITOR MAZZETI FILHO** e aprovada pela Comissão Julgadora em 20 de fevereiro de 2004.

Campinas, 03 de setembro de 2004.



Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro
Presidente da Banca

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**UTILIZAÇÃO DA INTERFEROMETRIA DE MOIRÉ NO
ESTUDO DE TENSÕES DINÂMICAS EM DISCOS FLEXÍVEIS.**

Dissertação submetida à banca examinadora
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola na Área de Concentração
de Máquinas Agrícolas.

VITOR MAZZETI FILHO

Orientador: Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro

Co-Orientador: Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck

**CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2004**

IDADE	BC
CHAMADA	T/VNIDMP
	M459u
EX	
VBO BC/	60504
DC.	16.11.04
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
EÇO	11.00
NTA	22.11.04
CPD	

3.b Id 330371

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M459u Mazzeti Filho, Vitor
Utilização da interfometria de moiré no estudo de tensões dinâmicas em discos flexíveis / Vitor Mazzeti Filho. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientadores: Inácio Maria Dal Fabbro e Oscar Antonio Braunbeck.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Máquinas agrícolas. 2. Interferometria. 3. Moiré, Método de. 4. Dinâmica das máquinas. 5. Deformação e tensões. 6. Deformação (Mecânica). Cana-de-açúcar - Colheita. I. Dal Fabbro, Inácio Maria. II. Braunbeck, Oscar Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

447937-0000

*À minha flor Marialice, pelo amor, ajuda, apoio, compreensão e incentivo e
aos meus filhos Otávio e Bernardo, pela alegria de tê-los....*

Dedico.

*Desconheço fato mais encorajador
que a habilidade inquestionável do
homem para melhorar sua vida
através do esforço consciente.*

H.D. Thoreau

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Ao professor Inácio M. Dal Fabbro, pelo acolhimento, confiança, ensinamentos, amizade, apoio e orientação.

Ao Professor Geraldo Mugayar, por abrir as portas do caminho que culminou na realização desse sonho.

Aos Professores Oscar Antônio Braunbeck, Antônio José da Silva Maciel e Antônio Carlos de Oliveira Ferraz, pela ajuda, amizade, conselhos e estímulo.

Ao pesquisador e amigo, Antonio Carlos Loureiro Lino, pela ajuda e apoio com técnicas e materiais.

À Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas

À Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

À Prefeitura Municipal de Santo André e ao grande amigo Luiz Henrique Rodrigues Zanetta pela oportunidade e incentivo.

Ao amigo Dílson pelas conversas e ajuda com programas e materiais.

Aos colegas de curso pelo companheirismo, amizade e discussões.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas em especial Leandro, Edgar e Claudinho, pela ajuda e equipamentos.

A todas aquelas pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho...

MEUS MAIS SINCEROS AGRADECIMENTOS

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
EPÍGRAFE	iii
AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Medição de Tensões, Deformações, Movimentos e Posições Relativas de Elementos de Máquinas.	1
1.2. Corte Basal de Cana-de-Açúcar	3
1.3. Emprego das Técnicas de <i>Moiré</i> Para Verificar o Seguimento de Um Plano por Um Disco Giratório Flexível.	4
2. OBJETIVOS	6
2.1. Objetivo Geral.	6
2.2. Objetivos Específicos.	6

3. REVISÃO DE LITERATURA	7
3.1. O Fenômeno de <i>Moiré</i> .	7
3.2. Retículos ou Grades.	8
3.3. A Solução Analítica das Franjas de <i>Moiré</i> .	10
3.4. Visualização das Franjas de <i>Moiré</i> .	12
3.5. Classificação das Técnicas de <i>Moiré</i> .	14
3.6. Métodos de Obtenção das Franjas de <i>Moiré</i> .	16
3.7. A Sensibilidade das Técnicas de <i>Moiré</i> .	17
3.8. As Técnicas de <i>Moiré</i> de Sombra.	19
3.9. Interpretação das Franjas nas Técnicas de <i>Moiré</i> de Sombra e Projeção.	20
3.9.1. Determinação das diferenças de cota para Iluminação com luz coerente.	21
3.9.2. Determinação das diferenças de cota para Iluminação com luz não coerente.	24
3.9.3. Determinação das diferenças de cota para as técnicas de <i>Moiré</i> de projeção.	25
3.10. Aplicações da Técnica de <i>Moiré</i> de Sombra.	26
3.11. Métodos para Aumentar a Sensibilidade das Técnicas de <i>Moiré</i> .	30
3.12. Sensibilidade e Exatidão da Técnica de <i>Moiré</i> de Sombra.	35
3.13. Utilização das Técnicas de <i>Moiré</i> para Medições de Objetos em Movimento.	36
3.14. A Cultura da Cana-de-Açúcar.	39
3.14.1. A colheita Mecanizada de cana-de-açúcar.	39
3.14.2. Mecanismos de corte.	40
3.14.3. Barras de corte alternativas.	41
3.14.4. Discos de corte rotativos.	41
3.14.5. Perdas e contaminação de matéria prima no corte mecanizado.	44
3.15. Erros Experimentais.	46
4. MATERIAL E MÉTODOS	50

4.1.	Estudos Preliminares.	50
4.1.1.	Arranjo Experimental.	50
4.1.2.	Obtenção e Tratamento das Imagens.	52
4.2.	Estudos de Acompanhamento do Perfil.	56
4.2.1.	Arranjo Experimental.	56
4.2.2.	Obtenção e Tratamento das Imagens.	61
4.2.3.	Comparação dos Perfis.	67
5.	RESULTADOS PRELIMINARES	68
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.	77
6.1.	Acurácia da Técnica de Moiré de Sombra.	77
6.2.	Capacidade de Acompanhamento do Perfil.	92
7.	CONCLUSÕES	107
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE FIGURAS

	página
Figura 1	Formação dos padrões ou franjas de <i>moiré</i> . 07
Figura 2	Diferentes tipos de retículos. 09
Figura 3	Franjas de <i>moiré</i> produzidas por 2 retículos superpostos. 10
Figura 4	Formação das franjas de <i>moiré</i> pela sobreposição de retículos constituídos de linhas paralelas. 11
Figura 5	Formação das franjas de <i>moiré</i> pela transmissão da luz através de dois retículos superpostos constituídos de linhas paralelas. 13
Figura 6	Transmissão dos raios luminosos formando as franjas em <i>moiré</i> de sombra. 20
Figura 7	Arranjo experimental para <i>moiré</i> de sombra com luz colimada. 22
Figura 8	Relações trigonométricas em <i>moiré</i> de sombra com luz coerente. 22
Figura 9	Arranjo experimental para <i>moiré</i> de sombra com luz não colimada. 24
Figura 10	Arranjo experimental para <i>moiré</i> de projeção. 26
Figura 11	Franjas de <i>moiré</i> mostrando os contornos topográficos de um manequim. 27
Figura 12	Topograma de <i>moiré</i> , e curva CMCT das costas de um paciente com escoliose idiopática. 28
Figura 13	Mudança nos contornos de <i>moiré</i> e índice de simetria do nariz antes e após cirurgia. 29
Figura 14	Franjas de <i>moiré</i> no método de multiplicação de fases. 31
Figura 15	Franjas de <i>moiré</i> no método de multiplicação de fases. 31
Figura 16	Representação esquemática do método de multiplicação de franjas. 32
Figura 17	Método da mudança de fase. 34
Figura 18	Desempacotamento de fases. 35
Figura 19	Princípio de funcionamento das "Moiré 3D Câmera". 37
Figura 20	Esquema de medições utilizando as "Moiré 3D Câmera". 38

Figura 21	Representação da precisão e exatidão das medidas.	48
Figura 22	Arranjo experimental esquemático.	52
Figura 23	Padrões de franjas para “z” = 25mm.	53
Figura 24	Padrões de franjas afinadas para “z” = 25mm.	53
Figura 25	Mapa de cores.	54
Figura 26	Modelos topográficos do disco.	54
Figura 27	Máscara para contagem de franjas.	55
Figura 28	Dispositivo utilizado para simular o perfil do solo.	58
Figura 29	Arranjo experimental esquemático para seguimento do perfil.	60
Figura 30	Imagem original regime estático e inclinação de 10 graus.	61
Figura 31	Imagem cortada e redimensionada.	62
Figura 32	Imagem filtrada e equalizada.	63
Figura 33	Imagem após detecção automática de franjas.	63
Figura 34	Imagem após reparo das franjas e remoção de ruídos.	64
Figura 35	Imagem com padrões de franjas afinadas .	65
Figura 36	Máscara de linhas radiais sobreposta aos padrões de franjas afinadas.	65
Figura 37	Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 5\text{mm}$.	69
Figura 38	Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 10\text{mm}$.	70
Figura 39	Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 15\text{mm}$.	70
Figura 40	Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 20\text{mm}$.	71
Figura 41	Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 25\text{mm}$.	71
Figura 42	Comparação Estático x Dinâmico para $z = 5\text{mm}$.	72
Figura 43	Comparação Estático x Dinâmico para $z = 10\text{mm}$.	72
Figura 44	Comparação Estático x Dinâmico para $z = 15\text{mm}$.	73
Figura 45	Comparação Estático x Dinâmico para $z = 20\text{mm}$.	73
Figura 46	Comparação Estático x Dinâmico para $z = 25\text{mm}$.	74
Figura 47	Comparação dos perfis do bordo do disco - Estático.	74
Figura 48	Comparação dos perfis do bordo do disco - Dinâmico.	75
Figura 49	Mapa topográfico regime dinâmico para $z = 25\text{mm}$.	75
Figura 50	Padrões de franjas para $\alpha = 5$ graus.	78

Figura 51	Padrões de franjas para $\alpha = 10$ graus.	79
Figura 52	Padrões de franjas para $\alpha = 15$ graus.	80
Figura 53	Padrões de franjas para $\alpha = 20$ graus.	81
Figura 54	Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 5$ graus.	82
Figura 55	Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 10$ graus.	83
Figura 56	Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 15$ graus.	84
Figura 57	Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 20$ graus.	85
Figura 58	Seguimento do perfil para 5 graus e 637 rpm.	95
Figura 59	Seguimento do perfil para 5 graus e 955 rpm.	95
Figura 60	Seguimento do perfil para 5 graus e 1273 rpm.	96
Figura 61	Seguimento do perfil para 5 graus e 1591 rpm.	96
Figura 62	Seguimento do perfil para 5 graus e 1910 rpm.	97
Figura 63	Seguimento do perfil para 10 graus e 637 rpm.	97
Figura 64	Seguimento do perfil para 10 graus e 955 rpm.	98
Figura 65	Seguimento do perfil para 10 graus e 1273 rpm.	98
Figura 66	Seguimento do perfil para 10 graus e 1591 rpm.	99
Figura 67	Seguimento do perfil para 10 graus e 1910 rpm.	99
Figura 68	Seguimento do perfil para 15 graus e 637 rpm.	100
Figura 69	Seguimento do perfil para 15 graus e 955 rpm.	100
Figura 70	Seguimento do perfil para 15 graus e 1273 rpm.	101
Figura 71	Seguimento do perfil para 15 graus e 1591 rpm.	101
Figura 72	Seguimento do perfil para 15 graus e 1910 rpm.	102
Figura 73	Seguimento do perfil para 20 graus e 637 rpm.	102
Figura 74	Seguimento do perfil para 20 graus e 955 rpm.	103
Figura 75	Seguimento do perfil para 20 graus e 1273 rpm.	103
Figura 76	Seguimento do perfil para 20 graus e 1591 rpm.	104
Figura 77	Seguimento do perfil para 20 graus e 1910 rpm.	104

LISTA DE QUADROS

		página
Quadro 1	Frequências típicas das técnicas de <i>Moiré</i> e suas respectivas sensibilidades.	18
Quadro 2	Medidas das cordas e das diferenças de cota obtidas numericamente.	58
Quadro 3	Cotas do bordo do disco para os cinco níveis de flexão.	67
Quadro 4	Estatísticas das cotas do bordo do disco medidas com paquímetro e <i>Moiré</i> de Sombra.	68
Quadro 5	Ordens de franja e cotas do bordo do disco para perfil com inclinação de 5 graus.	85
Quadro 6	Ordens de franja e cotas do bordo do disco para perfil com inclinação de 10 graus.	86
Quadro 7	Ordens de franja e cotas do bordo do disco para perfil com inclinação de 15 graus.	87
Quadro 8	Ordens de franja e cotas do bordo do disco para perfil com inclinação de 20 graus.	88
Quadro 9	Comparação entre os valores das cotas no regime estático com $\alpha = 5$ graus.	89
Quadro 10	Comparação entre os valores das cotas no regime estático com $\alpha = 10$ graus.	89
Quadro 11	Comparação entre os valores das cotas no regime estático com $\alpha = 15$ graus.	90
Quadro 12	Comparação entre os valores das cotas no regime estático com $\alpha = 20$ graus.	90
Quadro 13	Resumo das diferenças de cota entre <i>Moiré</i> - numérico e <i>Moiré</i> - paquímetro.	91
Quadro 14	Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco. Perfil com inclinação de 5 graus.	92

Quadro 15	Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco. Perfil com inclinação de 10 graus.	92
Quadro 16	Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco. Perfil com inclinação de 15 graus.	93
Quadro 17	Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco. Perfil com inclinação de 20 graus.	93
Quadro 18	Desvio padrão das diferenças entre as cotas numéricas e obtidas por <i>Moiré</i> .	104

LISTA DE SÍMBOLOS

$a(x, y)$	intensidade luminosa do fundo em cada ponto da imagem
$b(x, y)$	intensidade de modulação em cada ponto da imagem
d	distância entre a fonte de luz e o observador
f	frequência do retículo
h	distância entre o observador e o retículo de referência
I_0	intensidade da base
I_1, I_2, I_3	componentes harmônicas
k	constante que depende do arranjo experimental
N	número de ordem das franjas de <i>Moiré</i>
n	número inteiro
$p, p1, p2$	período ou passo dos retículos
p_m	período ou passo das franjas de <i>moiré</i>
R^2	coeficiente de correlação de Pearson
R_m	retículo do modelo
rpm	Rotações por minuto
R_r	retículo de referência
TM	técnica de <i>Moiré</i>
u	deslocamento na direção do eixo "x"
v	deslocamento na direção do eixo "y"
z	distância vertical
α	ângulo de inclinação do perfil/iluminação
β	ângulo de observação
Δw	erro relativo
Δz	diferença de cota entre dois pontos da superfície de um objeto
\square	ângulo formado entre as linhas de dois retículos
π	fração do período das franjas de <i>moiré</i>
ϕ	fase das franjas de <i>Moiré</i>

ϕ_x	componente de rotação em torno do eixo "x"
ϕ_y	componente de rotação em torno do eixo "y"
φ	ângulo formado entre a franja de <i>moiré</i> e o eixo das ordenadas
ψ	função relacionada ao deslocamento relativo de dois retículos

RESUMO

Na Engenharia Agrícola muitos problemas envolvem a determinação de deformações, movimentos ou posições relativas de elementos de máquinas em regime dinâmico. Ensaio dinâmicos utilizando-se métodos convencionais de instrumentação e análise de sinais para coleta e análise dos dados são particularmente complexos, pois exigem o contato da superfície do corpo analisado e o instrumento apropriado à medição da grandeza em estudo. No caso de peças rotativas, o problema se agrava uma vez que para transmitir os sinais dos sensores é necessário o uso anéis coletores e escovas, o que produz ruído nos sinais. Métodos numéricos por sua vez, possuem o inconveniente de ser pouco didáticos e não apresentar relação visível com o fenômeno físico em estudo, possibilitando que pequenos erros ou inconsistências nas propriedades dos materiais ou nas condições de contorno, levem a resultados completamente equivocados.

Existem métodos óticos que permitem a medição de deformações, movimentos e posições relativas de elementos de máquinas em ensaios dinâmicos, dentre eles, o método de *Moiré* que constitui-se uma ferramenta científica capaz de determinar deslocamentos de $0,5\mu\text{m}$.

Utilizando-se dos métodos convencionais e numéricos, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de determinar a posição relativa das lâminas de cortadores basais de plantas durante as operações de corte, visando reduzir perdas e contaminação de matéria prima, particularmente no caso colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar ocupa as primeiras colocações entre as espécies mais cultivadas no Brasil, maior produtor mundial, tendo seu cultivo intimamente dependente das operações de corte. No corte mecanizado, os mecanismos evoluíram pouco desde o início da década de 1970 e o cortador de discos duplos utilizado no corte basal apresenta um desempenho de varredura insatisfatório, fazendo com que o ajuste da altura de corte seja uma opção entre as perdas ou a contaminação da matéria prima.

Pesquisas nessa área estão divididas em uma linha direcionada à quantificação e redução da energia consumida no corte e outra na determinação e controle dos parâmetros dos

dispositivos de corte, visando o acompanhamento do perfil do solo a fim de reduzir perdas e contaminação da matéria prima minimizando enormes prejuízos do setor sucroalcooleiro.

Tendo em vista a complexidade dos métodos convencionais e numéricos para determinar posições relativas de elementos de máquinas e também a necessidade de se concentrar esforços na pesquisa de mecanismos alternativos que evitem a captação de impurezas durante a operação de corte mecanizado de cana-de-açúcar, o presente trabalho considera as hipóteses de que é possível utilizar as Técnicas de *Moiré* de Sombra para determinar as posições relativas de um disco giratório flexível ao acompanhar um dado perfil que simule a ação do solo nas operações de corte basal de plantas e também que os discos flexíveis apresentam elevado desempenho de varredura motivo pelo qual podem constituir-se em uma nova e grande opção na pesquisa de dispositivos para o corte basal de plantas.

Através de um sistema que utiliza uma fonte de luz comum para iluminação do disco em movimento, retículos ou grades obtidas através de técnicas comercialmente disponíveis e uma câmera fotográfica digital, as imagens de um disco flexível em movimento sobre um perfil que simula a ação do solo foram registradas e processadas em aplicativos computacionais, fornecendo informações relativas às deformações provocadas pelo movimento e ação do perfil. A análise dessas informações indicou viabilidade e elevada precisão da Técnica de *Moiré* de Sombra para determinar as posições relativas de um disco giratório flexível ao acompanhar um dado perfil que simule a ação do solo nas operações de corte basal de plantas e um excelente desempenho de varredura do perfil pelo disco nas velocidades e inclinações usualmente empregadas no corte mecanizado de cana-de-açúcar.

ABSTRACT

Problems involving strain, motion or relative position of farm machine elements determinations under dynamic conditions is of quite common occurrence. Dynamic tests involving traditional procedure and signal analysis would require instrument contact with body surface, which, quite frequently, generate complicated situations. Numerical methods as the Finite Element, Boundary Integral and others, are not so didactic and does'nt exhibit a visible relationship between the physical parameters envolved generating few inconsistencies or errors related to boundary conditions and material mechanical properties bringing unreliable results. Alternative optic methods to measure strain, motion and relative position are frequently reported, under th generic name of photoelasticity which includes speckle, holograms, the photoelastic particular methods and the *Moiré* family methods. The *Moiré* methods termed TM is a strong scientific tool capable of measurements in the order of 0,5 μ m. This reseach work reports a relative position study of a rubber disc idealized as a sugar cane base cutter. The sugarcane is one of the most cultivated crops in Brazil, considered the major world producer which faces particular harvesting problems. Harvesting operation is straight dependent on stalk cutting. Mechanized sugarcane harvesting involves base cutters which did not experience significant design development during the last three decades. In particular the double disc base cutter does not present good performance in following ground surface. In this sense, the height of stalk cut represents a choice between dirt contamination and non harvested cane or cane losses.

The research in this area of study is divided in two main lines, being one directed in reducing the amount of energy expended in the cut operation and the a second one directed in determining and controlling the cutting device operational parameters aiming in following ground profile avoiding cane contamination and material losses as well as improving mills performance.

By considering the difficulties in determining machine elements relative positions by traditional and the numerical methods and the necessity in concentrating efforts in searching for alternative devices to avoid dirt contamination and cane losses during cut

procedure, this research work consider two hypothesis. The first one consider feasible to employ a Shadow *Moiré* Technique in determining a flexible disc relative positions during a simulated base cutting operation following the ground profile. The second hypothesis considers a flexible disc cutter being inedited and great option in plants base cutting device research due to its high performance and capacity in following ground profile.

The experimental procedure employs a rotating rubber disc being deformed by a device which simulates the ground profile and a relatively simple and inexpensive optical setup including a common white light source to illuminate the rubber disc, gratings obtained by commercial techniques and a digital camera. Pictures of the flexible disc were taken and processed in a computer by commercial programs generating information on the disc relative positions as well as its capacity in following ground profile.

The analysis of these information indicates a high accuracy of the Shadow *Moiré* Techniques in determining machine moving parts relative positions and a high performance and capacity of the flexible disc in following a profile as the ground surface by employing the usual mechanized sugarcane harvesting operational parameters.

1. INTRODUÇÃO

Na Engenharia Agrícola depara-se muitas vezes com problemas que envolvem a determinação de tensões, deformações e movimentos relativos ou mesmo da posição relativa de peças e elementos de máquinas agrícolas sujeitos a esforços mecânicos em regime de trabalho com movimentos cíclicos, como eixos, rotores e discos de corte entre outros.

A determinação de tais tensões, deformações, movimentos ou posições relativas, mostra-se relativamente fácil quando é possível isolar a peça ou elemento de máquina e submetê-los a ensaios onde permaneçam estáticos, variando-se apenas as características dos esforços ou deslocamentos aplicados, utilizando-se de técnicas de instrumentação e análise de sinais para coleta, tratamento e análise dos dados.

Em certas situações, estes ensaios são insuficientes para a determinação das tensões, deformações e principalmente dos deslocamentos ou posições relativas das peças ou elementos de máquinas quando submetidos ao regime dinâmico, sendo então, necessária a realização de ensaios dinâmicos ou a modelagem matemática dos mecanismos e a simulação do seu comportamento através de métodos numéricos.

A realização de ensaios dinâmicos utilizando-se de técnicas convencionais de instrumentação e análise de sinais para coleta, tratamento e análise dos dados relativos às tensões, deformações, deslocamentos e posições relativas das peças ou elementos de máquina submetidos ao regime dinâmico, é particularmente complexa, uma vez que exige o contato entre a superfície do corpo a ser analisado e o instrumento apropriado à medição da grandeza em estudo. Particularmente no caso de peças rotativas, o problema se agrava uma vez que para transmitir os sinais dos sensores é necessário o uso anéis coletores e escovas, o que produz ruído nos sinais prejudicando sua análise e interpretação.

Os métodos numéricos, como o método dos elementos finitos e as integrais de contorno, apesar de amplamente difundidos e utilizados, além de sua complexidade, possuem por sua vez, o inconveniente de serem pouco didáticos não apresentando relação visível com o fenômeno físico em estudo, o que possibilita que pequenos erros ou inconsistências no

equacionamento das propriedades dos materiais a serem testados ou ainda nas condições de contorno, levem a resultados completamente equivocados.

Como alternativa aos métodos convencionais e também aos métodos numéricos, existem métodos óticos, conhecidos muitas vezes por métodos fotoelásticos, que permitem a medição de tensões, deformações, movimentos e posições relativas de peças e elementos de máquinas em regime dinâmico, dentre as quais podem ser citadas a Holografia, o Speackle a Fotoelasticidade Clássica e Método de *Moiré*.

Dentre os métodos fotoelásticos, o método de *Moiré* é certamente o mais versátil e consiste em superpor dois retículos com a formação um pequeno ângulo entre estes. Um dos retículos deforma-se acompanhando a deformação do corpo em estudo enquanto que o outro permanece inalterado e é usado como referência.

A difração da luz que passa pelos dois retículos, provoca o aparecimento de padrões semelhantes a ondas ou franjas os quais chamamos de padrões ou franjas de *Moiré*. O uso de retículos superpostos para a formação dos padrões ou franjas de *Moiré* e sua interpretação permite, entre outras coisas, determinar deslocamentos no plano, rotação em relação a eixos de referência, deslocamento de pontos de uma superfície observada em relação a uma superfície de referência, ou ainda a inclinação de uma superfície observada em relação a um estado de referência.

A superposição dos retículos para obtenção das franjas pode ser realizada das mais variadas formas sendo possível superpor fisicamente dois retículos, ou então, utilizando-se técnicas de projeção, fotografia, digitalização de imagens, holografia eletrônica e até mesmo TV, superpor dois registros de um mesmo retículo, sendo um antes e outro após a deformação.

O método de *Moiré* vem sendo utilizado no estudo de deformações desde 1874 e hoje em dia, juntamente com as várias técnicas de superposição dos retículos desenvolvidas, constitui-se uma ferramenta científica capaz de determinar deslocamentos da ordem de até $0,5 \mu m$ sendo utilizada em diversas áreas do conhecimento dentre elas, na medicina no estudo da deformação e topografia de órgãos do corpo humano, nas engenharias eletrônica e mecânica no estudo de tensões, deformações e vibrações, na engenharia de produção para identificar forma e defeitos em produtos, na engenharia agrícola no estudo da forma de órgãos e no comportamento mecânico do tecido vegetal, como também no controle de qualidade de operações de preparo de solo com base na determinação do microrelevo ou rugosidade

superficial antes e após a sua execução ou ainda, no controle de qualidade de componentes de máquinas com relação à sua forma seja por defeitos de fabricação ou por desgaste no caso de peças ativas.

Ainda na engenharia agrícola, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de determinar a posição relativa das lâminas de cortadores basais de plantas durante as operações de corte, visando reduzir perdas e contaminação de matéria prima, particularmente no caso colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

Ocupando uma das primeiras colocações no ranking das espécies mais plantadas nas zonas tropicais e equatorial do globo terrestre, a cana-de-açúcar, cobre extensas regiões na Ásia, Austrália, África e em praticamente todo o Continente Americano, sendo o Brasil o maior produtor mundial respondendo por aproximadamente 25% de toda a produção.

A cana-de-açúcar tem seu cultivo intimamente dependente das operações de corte, quer seja manual ou mecanizado, sendo o setor sucroalcooleiro um dos mais mecanizados e ao mesmo tempo, que mais emprega mão-de-obra no Estado de São Paulo onde a área colhida mecanicamente tem aumentado consideravelmente nas últimas safras, tendência que deverá ser mantida nos próximos anos.

Apesar de ser a cultura da cana muito difundida em todo o mundo, informações sobre o mecanismo usado nas colhedoras mecânicas para o corte de base são difíceis de ser encontradas, sendo mais comumente usados os discos de corte com lâminas radiais, que executam uma combinação dos movimentos de rotação e translação e o princípio de corte inercial.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas acerca da colheita mecanizada de cana-de-açúcar, e, enormes têm sido os avanços tecnológicos incorporados às máquinas colhedoras, entretanto, o princípio, os mecanismos e as ferramentas ativas de corte, evoluíram pouco desde o início da mecanização em escala comercial da colheita de cana-de-açúcar no princípio da década de 1970 até o presente momento, sendo que o cortador de disco duplo utilizado para o corte basal nas colhedoras de cana picada, apresenta um desempenho de varredura insatisfatório, fazendo com que o ajuste da altura de corte seja uma opção entre as perdas ou contaminação de matéria prima.

As pesquisas mais importantes nessa área estão divididas em duas grandes linhas, sendo a primeira direcionada à quantificação e redução da energia consumida nas operações de corte e a segunda, na determinação e controle dos parâmetros dos dispositivos de corte, visando o acompanhamento do perfil do solo a fim de reduzir as perdas e principalmente a contaminação da matéria prima.

Nesse caso, as pesquisas buscam desenvolver mecanismos que possibilitem ao cortador de base acompanhar o perfil do solo automaticamente, sendo propostos mecanismos que atuam no sistema hidráulico, dispositivos baseados no alcance ultrassônico e mecanismos de quatro barras, sendo que apenas este último apresenta utilizações práticas.

Apesar de os estudos atuais serem desenvolvidos com o objetivo de minimizar as perdas e contaminação de matéria prima que chegam a atingir 15% e 6% respectivamente, existem limitações intrínsecas no princípio operacional do cortador de discos rígidos que impedem a redução dos níveis de contaminação abaixo dos praticados nos dias de hoje, sendo necessário concentrar esforços na pesquisa de mecanismos alternativos que evitem a captação de impurezas através do seguimento do perfil do solo durante a operação de corte, minimizando os enormes prejuízos do setor sucroalcooleiro.

Tendo em vista a dificuldade e complexidade dos métodos convencionais para determinação de tensões, deformações, movimentos e posições relativas de elementos de máquinas e também a necessidade de se concentrar esforços na pesquisa de mecanismos alternativos que evitem a captação de impurezas através do seguimento do perfil do solo durante a operação de corte mecanizado de cana-de-açúcar, o presente trabalho de pesquisa considera as seguintes hipóteses:

- É possível utilizar as Técnicas de *Moiré* de Sombra para determinar, com a necessária precisão, deslocamentos e posições relativas de corpos em movimento como no presente caso, a capacidade de um disco giratório flexível de acompanhar um dado perfil que simule a ação do solo nas operações de corte basal de plantas.

- Os discos flexíveis podem constituir-se em uma nova e grande opção na pesquisa de dispositivos de corte basal de plantas em função de sua capacidade de seguimento de um perfil que simule a ação do solo.

A proposta do presente trabalho é a utilização da Técnica de *Moiré* de Sombra para determinação da capacidade de seguimento de um perfil que simule a ação do solo por um disco giratório construído em material flexível. Através de um arranjo experimental relativamente simples e de baixo custo que utiliza uma fonte de luz comum para iluminação do disco em movimento, retículos ou grades obtidas através de técnicas comercialmente disponíveis e um sistema de aquisição de imagens através de uma câmera fotográfica digital, a imagem do disco em movimento é registrada e após ser processada em aplicativos computacionais pode fornecer as informações relativas às deformações sofridas devido ao seu movimento giratório e a ação do perfil que simula a ação do solo. A análise das deformações sofridas pelo disco indica sua capacidade de seguimento do perfil.

A vantagem de se utilizar as Técnicas de *Moiré* de Sombra é que não são necessários equipamentos e técnicas sofisticadas de aquisição de imagens e principalmente pelo fato de que a imagem do disco revelar diretamente as deformações sofridas devido ao seu movimento e a ação do perfil.

Nos últimos anos, com relação às Técnicas de *Moiré*, muita ênfase foi dada às técnicas de sobreposição dos retículos, aquisição, tratamento e análise das imagens, sendo que poucas tentativas de aplicação em ensaios dinâmicos podem ser observadas. Com relação à diminuição de perdas e contaminação de matéria prima no corte mecanizado da cana-de-açúcar, as pesquisas têm sido direcionadas no sentido de promover um controle da altura de corte dos discos rígidos convencionais que apresentam um desempenho de varredura insatisfatório.

Nesse sentido, o presente trabalho justifica-se em função da oportunidade de gerar conhecimento em relação à aplicabilidade das Técnicas de *Moiré* nas atividades ligadas ao projeto, desenvolvimento e otimização de máquinas e equipamentos agrícolas e principalmente pela abertura de novas possibilidades de pesquisa, através da proposição de um novo conceito, o do disco flexível para corte basal de plantas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral.

O objetivo geral do presente trabalho de pesquisa é implementar a utilização da Técnica Interferométrica de *Moiré* de Sombra, na determinação das posições relativas de componentes de máquinas agrícolas em movimento.

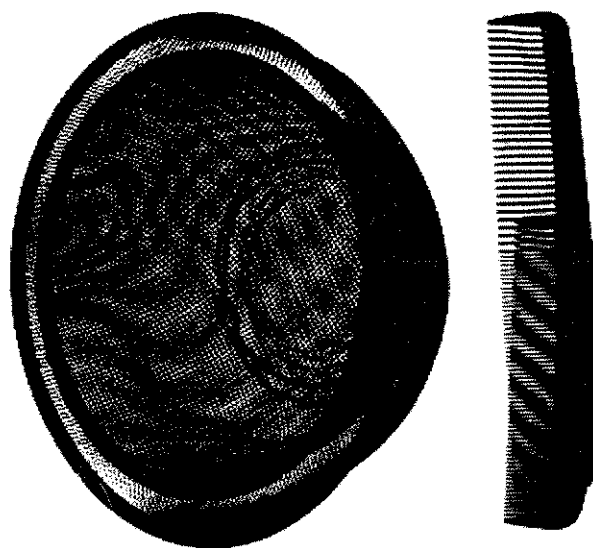
2.2. Objetivos Específicos.

- Adequar a metodologia para uso da técnica de *Moiré* de sombra em ensaios dinâmicos.
- Utilizar a técnica de *Moiré* de sombra para determinar a capacidade de um protótipo de disco de corte flexível em seguir um dado perfil que simula a ação do solo nas operações de corte basal de plantas.
- Introduzir o conceito de discos flexíveis para o corte basal de plantas visando um melhor acompanhamento do perfil do solo com conseqüente redução de perdas e contaminação de matéria prima.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. O Fenômeno de *Moiré*.

Quando se olha através de duas telas ou grades sobrepostas, nota-se a formação de padrões ou franjas, que são resultado da combinação das linhas dessas telas. Esse fenômeno é chamado de fenômeno ou efeito de *Moiré*, e as franjas produzidas são chamadas de padrões ou franjas de *Moiré*.



a) lavador de arroz

b) pente

Figura 1: Formação dos padrões ou franjas de *Moiré* quando se olha através de duas estruturas periódicas.

Fonte: POST, HAN & IFJU (1994).

Segundo SCIAMMARELLA (1982), a palavra “*Moiré*” que é de origem francesa e quer dizer “molhado”, denomina um tecido de seda importado da antiga China. Esse tecido é

composto de duas camadas e quando existe movimento relativo entre elas, aparecem padrões semelhantes a ondas denominadas franjas de *Moiré*, e que uma das primeiras utilizações científicas do fenômeno de *Moiré*, foi o estudo da deformação da mica, feita por MULOT (1925), mas entretanto, segundo OSTER & NISHIJIMA (1964), o fenômeno de *Moiré* foi estudado primeiramente por um lorde inglês, o físico RAYLEIGH (1874), quem sugeriu que esse fenômeno poderia ser usado para testar a perfeição de grades de difração.

TOLLENAAR (1945), apud SCIAMMARELLA (1982), apud CLOUD (1998), estudando o fenômeno, descobriu que as franjas de *Moiré* poderiam dar uma alta sensibilidade a medições de movimentos relativos pois são na verdade magnificadoras de movimento.

Vários autores a partir das constatações de TOLLENAAR (1945), empregaram o fenômeno para o estudo de deslocamentos, deformações e tensões, entre eles WELLER & SHEPARD (1948) apud CLOUD (1998), DANTU (1964), apud CLOUD (1998). Após, o método foi refinado e aplicado numa grande variedade de circunstâncias por RILEY & DURELLI (1962), apud CLOUD (1998), THEOCARIS (1969), apud CLOUD (1998), DURELLI & PARKS (1970).

OSTER, WASSERMAN & ZWERLIG (1964) fizeram os primeiros estudos para estabelecer as relações entre grades superpostas e as franjas de *Moiré* resultantes.

TAKASAKI (1970) e TAKASAKI (1973), para medir o relevo de objetos e pessoas, utilizaram a sobreposição de uma grade sobre a sua própria sombra para gerar um padrão semelhante às curvas de nível de mapas topográficos pois nesse caso, as franjas de *Moiré* formadas são constituídas por um conjunto de pontos de mesma cota.

3.2. Retículos ou Grades.

Os retículos ou grades são estruturas periódicas que se constituem de linhas paralelas ou radiais, círculos ou elipses concêntricas ou mesmo pontos, espaçados, que podem ser equidistantes ou não.

Os retículos mais comumente utilizados são constituídos por linhas ou faixas claras (transparentes) e escuras (opacas), paralelas e eqüidistantes.

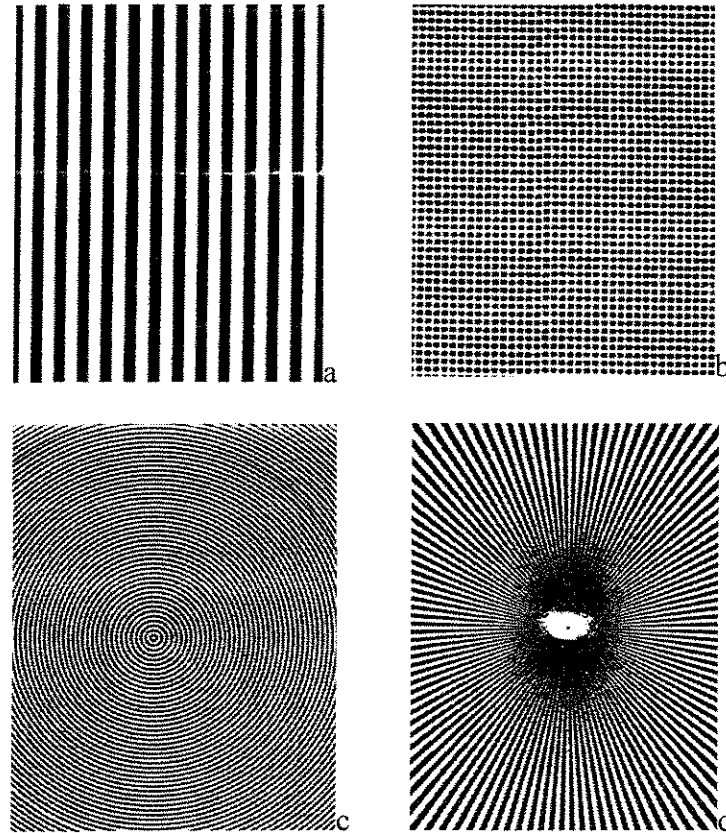


Figura 2: Diferentes tipos de retículos. a. linhas paralelas, b. pontos eqüidistantes, c. círculos concêntricos, d. linhas radiais

Fonte: DURELLI & PARKS (1970).

O centro das faixas (claras ou escuras) é chamado linha de grade, e a distância entre as linhas de grade de duas faixas escuras (ou duas faixas claras) contíguas é o período ou passo (p) do retículo.

Segundo POST, HAN & IFJU (1994), a frequência (f) do retículo equivale ao número de linhas por unidade de comprimento e um exemplo comum de frequência de retículo é dez linhas por milímetro para *Moiré* geométrico sendo que para a maioria das aplicações, a frequência não excede as quarenta linhas por milímetro.

DURELLI & PARKS (1970), citam os retículos ou grades divididos em três categorias, sendo os retículos de baixa densidade, com frequência em torno de três linhas por milímetro, podendo ser estas paralelas, cruzadas, logarítmicas, radiais circulares ou elípticas ou ainda constituídos por pontos. São obtidos por técnicas convencionais de desenho e impressão, portanto, bastante disponíveis comercialmente e a preços bem acessíveis. Este tipo de retículo é suficiente para produzir bons resultados em estudos de flexão em estruturas ou arcos.

Os Retículos de média densidade são aqueles com frequência em torno de 8 linhas por milímetro e os de alta densidade cujas frequências podem superar as 80 linhas por milímetro são difíceis de serem obtidos, podendo atingir preços acima de mil dólares americanos, para tamanhos de 15 x 15 centímetros.

3.3. A Solução Analítica das Franjas de *Moiré*.

Segundo NISHIJIMA (1964), as franjas ou padrões de *Moiré* são produzidos quando se sobrepõem duas estruturas periódicas, chamadas retículos ou grades.

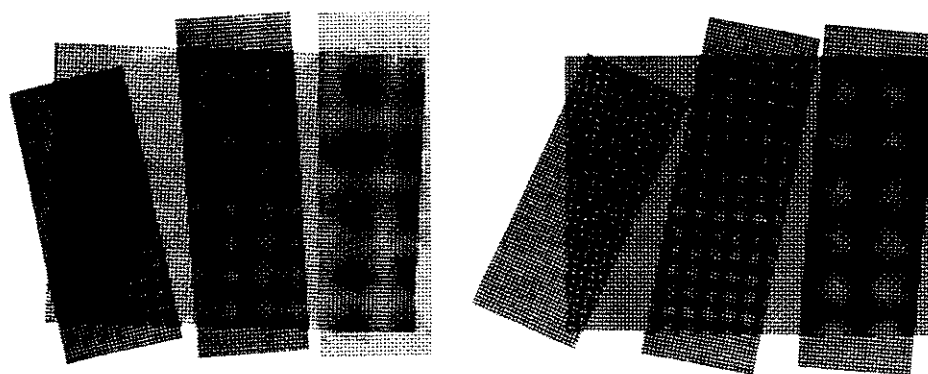


Figura 3. Franjas de *Moiré* produzidas por 2 retículos superpostos

Fonte: DURELLI & PARKS (1970).

Quando essa superposição ocorre formando um pequeno ângulo de interseção entre as linhas dos dois retículos, pequenos deslocamentos, em um dos dois retículos, provocarão grandes deslocamentos nas franjas de *Moiré*, isto é, o deslocamento será magnificado.

NISHIJIMA (1964) e OSTER & NISHIJIMA (1964) apresentaram uma solução geométrica para explicar as franjas de *Moiré* considerando o caso de dois retículos, que possuem linhas eqüidistantes. Um deles o retículo R1, possui linhas paralelas ao eixo “y”, com período “ $p1$ ”, é sobreposto por outro, o retículo R2, que possui linhas com período “ $p2$ ”, diferente de “ $p1$ ”, formando um ângulo θ com o eixo “y”. Quando esta sobreposição acontece, observa-se o aparecimento de um terceiro retículo formado pela interseção das linhas dos retículos R1 e R2 que são as franjas de *Moiré*.

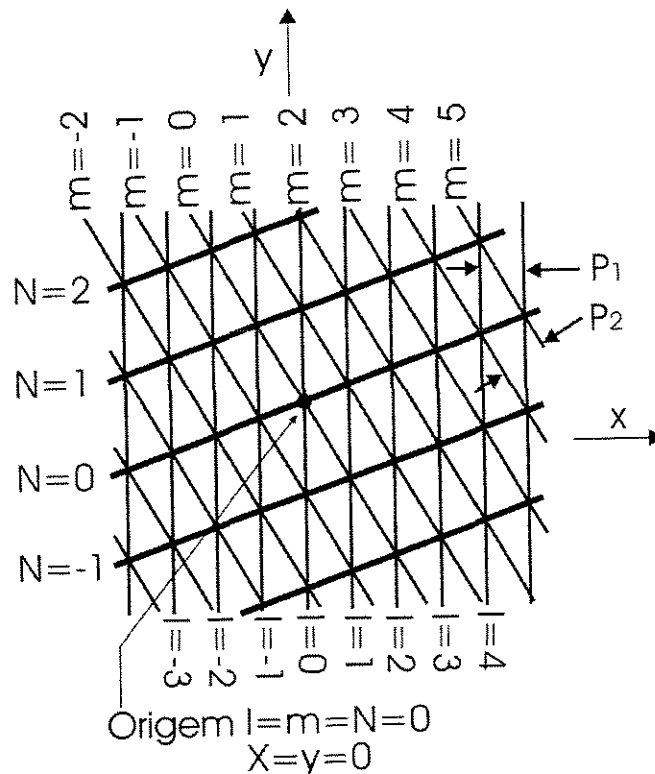


Figura 4: Formação das franjas de *Moiré* pela sobreposição de retículos constituídos de linhas paralelas.
Fonte CLOUD (1998).

Com base nos elementos da Figura 4, a solução geométrica das franjas de *Moiré* é dada pela Equação 1.

$$\sin \varphi = \frac{p_2 \sin \theta}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2 p_1 p_2 \cos \theta}} \quad (1)$$

em que:

p_1 = período do retículo $R1$

p_2 = período do retículo $R2$

θ = ângulo formado entre as linhas de $R1$ e $R2$

φ = ângulo formado entre a franja de *Moiré* e o eixo das ordenadas

e,

$$p_m = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2 p_1 p_2 \cos \theta}} \quad (2)$$

em que:

p_m = período da franja de *Moiré*

Quando os dois retículos possuem o mesmo período, isto é $p_1 = p_2 = p$, a equação (2) fica reduzida a:

$$p_m = \frac{p}{2 \sin \left(\frac{\theta}{2} \right)} \quad (3)$$

3.4. Visualização das Franjas de *Moiré*.

Um aspecto a ser considerado na visualização das franjas de *Moiré* é que esta se comporta, na maioria das vezes, como ondas sinusoidais ou seja, a intensidade da luz observada é a média da luz transmitida através dos retículos 1 e 2.

Onde a luz transmitida é máxima tem-se o centro das franjas claras e onde a luz transmitida tende a zero, tem-se o centro das franjas escuras.

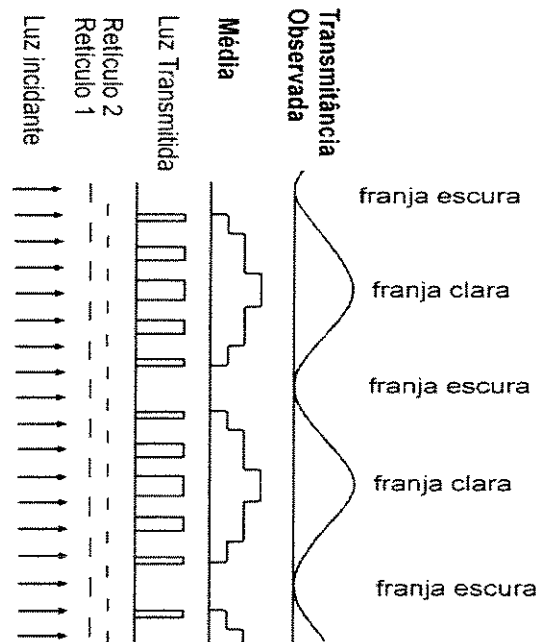


Figura 5: Formação das franjas de *Moiré* pela transmissão da luz através de dois retículos superpostos constituídos de linhas paralelas. Fonte: CLOUD (1998).

Segundo WHITEHOUSE (1994), a intensidade da luz transmitida na direção normal à direção do eixo x é:

$$I(x) = I_0 + I_1 \cos 2\pi\psi(x) + I_2 \cos 4\pi\psi(x) + I_3 \cos 6\pi\psi(x) + \dots \quad (4)$$

em que:

I_0 = é a intensidade da base

I_1, I_2, I_3 = são componentes harmônicas

A função $\psi(x)$ está relacionada ao deslocamento relativo dos dois retículos na direção x que é chamada $u(x)$, através da relação:

$$u(x) = p\psi(x) \quad (5)$$

em que:

p = é o período do retículo de referência, e

$$\psi(x) = \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p(x)} \right) x \quad (6)$$

em que:

$p(x)$ = é o período equivalente local do retículo deformado

É possível observar que a intensidade da luz será máxima quando:

$$p\psi(x) = n \quad (7)$$

em que:

n = é um número inteiro

Analogamente, a intensidade da luz será mínima quando:

$$p\psi(x) = \frac{1}{2}(2n + 1) \quad (8)$$

As franjas claras são locais de pontos onde o retículo do modelo, com relação ao retículo de referência, na sua direção normal, é igual a um número inteiro multiplicado pelo período do retículo de referência. As franjas escuras, por sua vez, têm a mesma interpretação mas em termos de $\frac{1}{2}$ período.

3.5. Classificação das Técnicas de *Moiré*.

ASSUNDI & YUNG (1991), definem as técnicas de *Moiré* como sendo um conjunto de técnicas versáteis baseadas no fenômeno de *Moiré*, usados para medição de deformação no plano e fora do plano, contornos topográficos, inclinação, curvatura e formas dos objetos.

Várias tentativas de classificação das técnicas de *Moiré* foram realizadas por diversos autores, levando em consideração o período do retículo, a formação das franjas e o tipo de deformação estudada, sendo as principais citadas abaixo.

SCIAMMARELLA (1982), classificou as técnicas de *Moiré* em três grupos básicos sendo:

Método de <i>Moiré</i>:	também chamado de método de <i>Moiré</i> intrínseco, fornece o deslocamento dos pontos de uma superfície observada em relação a sua posição inicial.
<i>Moiré</i> de projeção:	também conhecido como <i>Moiré</i> de sombra, fornece o deslocamento dos pontos de uma superfície observada em relação a sua posição original.
<i>Moiré</i> de reflexão:	fornece a inclinação dos pontos de uma superfície observada em relação a um estado de referência.

ASSUNDI & YUNG (1991), classificaram as técnicas de *Moiré* de acordo com o período dos retículos ou grades subdividindo-os em três métodos distintos sendo:

Métodos do retículo:	utiliza geralmente retículos com período maior que 1mm.
Métodos de <i>Moiré</i>:	utiliza geralmente retículos com período variando entre 0,1 e 1mm.
<i>Moiré</i> interferométrico:	utiliza retículos com período menor que 0,1mm.

AJOVALASIT (1998), classifica as técnicas de *Moiré* levando em consideração o tipo de deformação a ser estudada subdividindo-os em 5 métodos distintos sendo:

***Moiré* geométrico plano:** fornece os componentes " u " e " v " do deslocamento no plano, sendo normalmente de baixa sensibilidade.

***Moiré* interferométrico:** fornece os componentes " u " e " v " do deslocamento no plano, mas ao contrário do *Moiré* geométrico plano, é de alta sensibilidade.

***Moiré* holográfico:** fornece os componentes " u " e " v " do deslocamento no plano, sendo também de alta sensibilidade.

***Moiré* por reflexão:** fornece os componentes " ϕ_x " e " ϕ_y " da rotação.

3.6. Métodos de Obtenção das Franjas de *Moiré*.

Segundo ASSUNDI & YUNG (1991), os métodos de *Moiré* apesar de todas as suas variações e classificações, fornecem sempre a mesma informação e podem ser interpretados da mesma maneira sendo que diferença entre eles reside nos métodos óticos utilizados para formação das franjas de *Moiré*. As diferenças entre os diversos métodos de *Moiré* residem na iluminação dos corpos, na maneira com que o retículo do modelo é gerado e também na técnica usada para superposição dos retículos e conseqüente visualização das franjas de *Moiré*.

Em todas as técnicas de *Moiré*, para que ocorra a formação dos padrões das franjas, são necessários dois retículos, um deles acompanha o contorno do objeto e é chamado de retículo deformado ou retículo do modelo (R_m) e o outro permanece indeformado servindo como referência, portanto é chamado de retículo indeformado ou retículo de referência (R_r). Os retículos de referência e do modelo podem significar tanto dois retículos fisicamente separados quanto dois registros do mesmo retículo, um antes e outro depois da deformação.

SCIAMMARELLA (1982), comenta também que os métodos de *Moiré* diferem na maneira com que o retículo do modelo é gerado sendo que nos métodos de *Moiré* geométrico ou intrínseco, os quais fornecem informações sobre deslocamentos no plano, o retículo do

modelo é constituído fisicamente, sendo aderido ou impresso no objeto e acompanha a sua deformação quando este é submetido a esforços. As franjas podem ser obtidas por dupla exposição fotográfica ou sobreposição de imagens digitalizadas, uma antes e outra após a deformação.

Segundo CLOUD (1998), nos métodos de *Moiré* de projeção, os quais fornecem informações sobre deslocamentos fora do plano, o retículo do modelo é obtido através da projeção oblíqua do retículo de referência sobre a superfície do objeto, modulando a topografia do mesmo. A obtenção das franjas é feita através de dupla exposição fotográfica ou sobreposição de imagens digitalizadas, uma antes e outra após a deformação.

Nos métodos de *Moiré* de reflexão, os quais fornecem informações sobre deslocamentos fora do plano, o retículo do modelo é a imagem de um retículo visto através da imagem reflexiva do objeto, e a obtenção das franjas também é conseguida através de dupla exposição fotográfica ou sobreposição de imagens digitalizadas, uma antes e outra após a deformação.

Nos métodos de *Moiré* de sombra, os quais também fornecem informações sobre deslocamentos fora do plano, o retículo do modelo é a própria sombra do retículo de referência que é projetada sobre a superfície do objeto em estudo, que em alguns casos, para melhorar a visualização das franjas, deve ser previamente pintada com tinta reflexiva branca. Este método permite a visualização direta das franjas observando o objeto em estudo através do retículo de referência.

A determinação dos deslocamentos é feita, comparando-se duas imagens das franjas de *Moiré*, uma antes e outra depois da deformação do objeto.

3.7. A Sensibilidade das Técnicas de *Moiré*.

A sensibilidade das técnicas de *Moiré* está diretamente relacionada ao período do retículo. O uso de retículos com períodos menores, conferem uma maior sensibilidade à técnica. Para determinação de deformações no plano quando é necessário medir

deslocamentos muito pequenos é imprescindível a utilização de retículos com frequências elevadas.

Segundo SCIAMMARELLA (1982), para a maioria das aplicações de trabalhos normais a frequência dos retículos varia de 1 a 40 linhas/mm. As franjas produzidas por retículos com baixas densidades de linhas podem ser observadas a olho nu utilizando-se luz comum, porém para utilizar retículos com elevadas densidades de linhas, é necessário usar luz coerente em virtude do efeito de difração da luz se tornar dominante.

POST, HAN & IFJU (1994), afirmam também que um exemplo comum de frequência de retículo é 10 linhas por milímetro para *Moiré* geométrico sendo que, para a maioria das aplicações, a frequência não excede as 40 linhas por milímetro.

ASSUNDI & YUNG (1991), afirmam que a frequência típica dos retículos de *Moiré* usados é de 20 a 40 linhas/mm para o *Moiré* geométrico plano e de 1000 a 2000 linhas/mm para o *Moiré* interferométrico, sendo o deslocamento por ordem de franja da ordem de $0,5 \mu\text{m}$ para o *Moiré* interferométrico, $25 \mu\text{m}$ para o geométrico plano e $100 \mu\text{m}$ para o de sombra.

O quadro, mostra a frequência típica de três das técnicas de *Moiré* e a sensibilidade de cada uma.

Quadro 1: Frequências típicas das técnicas de *Moiré* e suas respectivas sensibilidades.

Fonte: LINO (2002).

Técnica	Frequência	Sensibilidade
De sombra	< 20	100
Geométrico Plano	20 a 40	25
Interferométrico	1000 a 2000	0,5

Para a técnica de *Moiré* geométrico, utilizada na medição de deformações, a sensibilidade pode ser expressa pela equação abaixo:

$$\mathcal{E}_{xx} = \frac{du}{dx} = p \left(\frac{dN}{dx} \right) \quad (9)$$

em que:

\mathcal{E}_{xx}	=	deformação na direção x.
u	=	deslocamento na direção x
p	=	período do retículo
N	=	número de ordem das franjas de <i>Moiré</i> produzidas pela deformação do objeto em estudo.

Dependendo do arranjo experimental utilizado, o período da franja de *Moiré* gerado é dado por:

$$\mathcal{E}_{xx} = p(dN/dx) = p/p_m \quad (10)$$

em que:

$$p_m = \text{período da franja de } Moiré$$

3.8. As Técnicas de *Moiré* de Sombra.

Nas técnicas de *Moiré* de sombra, a formação das franjas se deve à interferência ótica entre o retículo de referência e o retículo do modelo, sendo que o segundo, na verdade, é a sombra do primeiro, projetada sobre o componente a analisar.

Como demonstrado por CLOUD (1998), na formação das franjas de *Moiré* de sombra o retículo do modelo acompanha a topografia do objeto que é observado através do retículo de referência.

Em determinadas áreas, as linhas do retículo do modelo, sob a perspectiva do observador, se encontram sob as linhas do retículo de referência, permitindo a transmissão dos raios luminosos refletido pela superfície do objeto, formando as franjas claras. As franjas escuras, por sua vez, são formadas nas áreas onde as linhas do retículo do modelo estão alinhadas às linhas do retículo de referência, impedindo a transmissão para o observador dos raios luminosos.

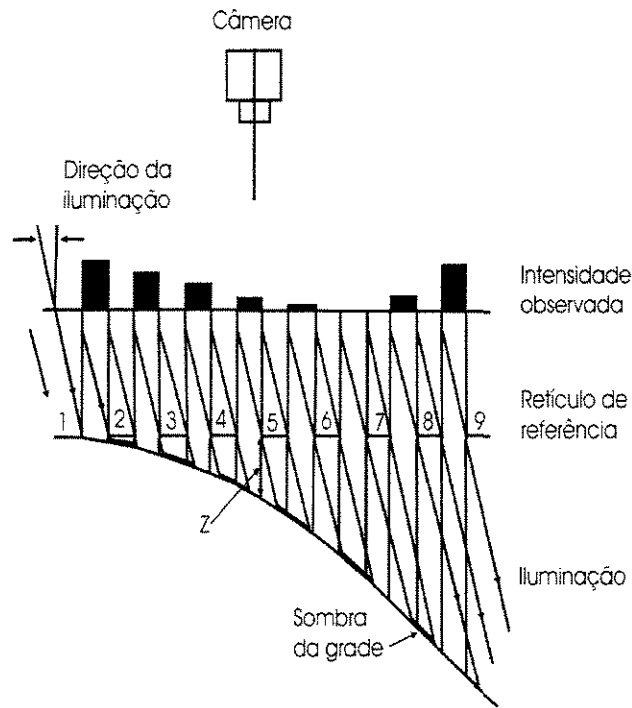


Figura 6: Transmissão dos raios luminosos formando as franjas em *Moiré* de sombra.

Fonte: CLOUD (1998).

3.9. Interpretação das Franjas nas Técnicas de *Moiré* de Sombra e Projeção.

Nas técnicas de *Moiré* de sombra e projeção, as franjas observadas, fornecem o deslocamento dos pontos de uma superfície observada em relação a sua posição original, portanto, são elas prioritariamente utilizadas para a determinação de deslocamentos fora do plano. Segundo AJOVALASIT (1998), se satisfeitas determinadas condições relativas à geometria do sistema de iluminação e de observação das franjas de *Moiré*, para as duas técnicas, a distância “z” do retículo de referência ao corpo em estudo é dada por:

$$z = kpN \quad (11)$$

em que:

z = distância vertical da superfície do objeto ao retículo de referência.

k = constante que depende do arranjo experimental.

p = período do retículo.

N = número de ordem das franjas de *Moiré*.

3.9.1. Determinação das diferenças de cota para iluminação com luz coerente.

Segundo MEADOWS, JONHSON & ALLEN (1970), WHITEHOUSE (1994) e POST, HAN & IFJU (1994), a diferença de cota ($\Delta z = z_1 - z_2$) entre dois pontos localizados na superfície do corpo a ser analisado, para o observador e fonte de luz localizados no infinito (luz colimada) é dada por:

$$\Delta z = \frac{Np}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad (12)$$

em que:

N = número de ordem da franja

p = período do retículo

α = ângulo de iluminação

β = ângulo de observação

Os arranjos experimentais típicos para *Moiré* de sombra com fonte de luz e observador posicionados no infinito (luz colimada) e com fonte de luz e observador posicionados a uma distância conhecida do objeto são mostrados nas figuras 7 e 9.

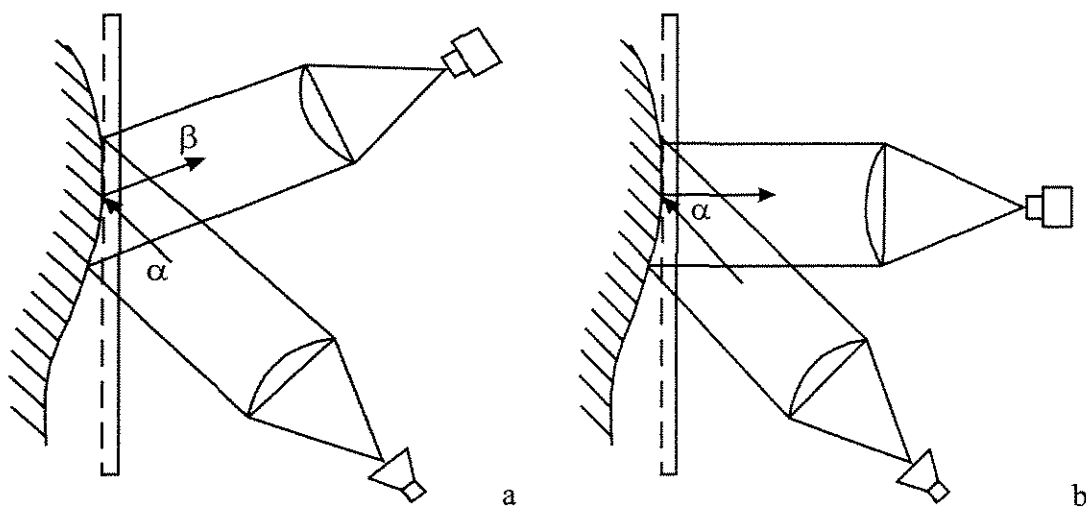


Figura 7: Arranjo experimental para *Moiré* de sombra com luz colimada. a. Com observador posicionado obliquamente em relação ao retículo de referência. b. Com observador posicionado perpendicularmente em relação ao retículo de referência.

Fonte: POST, HAN & IFJU (1994)

POST, HAN & IFJU (1994), determinaram ainda para os arranjos experimentais mostrados acima, a distância de um ponto sobre a superfície do objeto em estudo ao retículo de referência através das relações trigonométricas mostradas na figura 8.

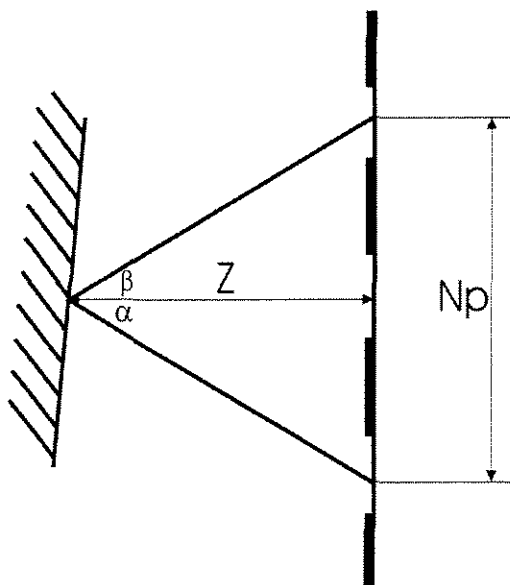


Figura 8: Relações trigonométricas em *Moiré* de sombra com luz coerente.

Fonte: POST, HAN & IFJU (1994).

$$Np = z \tan \alpha + z \tan \beta \quad (13)$$

em que:

N = número de ordem da franja

p = período do retículo

α = ângulo de iluminação em relação à direção normal ao retículo

β = ângulo de observação em relação à direção normal ao retículo

Z = distância vertical da superfície do objeto ao retículo de referência.

Resolvendo-se a equação (13) para a variável “ z ” obtém-se a equação (14):

$$z = \frac{Np}{(\tan \alpha + \tan \beta)} \quad (14)$$

Para o caso do observador localizado perpendicular ao plano do retículo de referência, quando $\tan \beta = 0$, a equação (14) reduz-se a:

$$z = \frac{Np}{\tan \alpha} \quad (15)$$

Ainda para o caso do observador localizado perpendicular ao plano que contém o retículo de referência, conforme mostra a figura 7b., TAKASAKI (1970), propõe uma outra equação para a determinação da cota entre duas franjas.

$$z = Np \cot \alpha \quad (16)$$

3.9.2. Determinação das diferenças de cota para iluminação com luz não coerente.

Da mesma maneira que para iluminação com fonte de luz coerente, MEADOWS, JONHSON & ALLEN (1970), WHITEHOUSE (1994) e POST, HAN & IFJU (1994), também determinam a cota "z" para um arranjo experimental com iluminação feita através de uma fonte de luz não coerente (não colimada), isto é, com o observador e fonte de luz localizados à mesma distância conhecida do objeto a ser estudado.

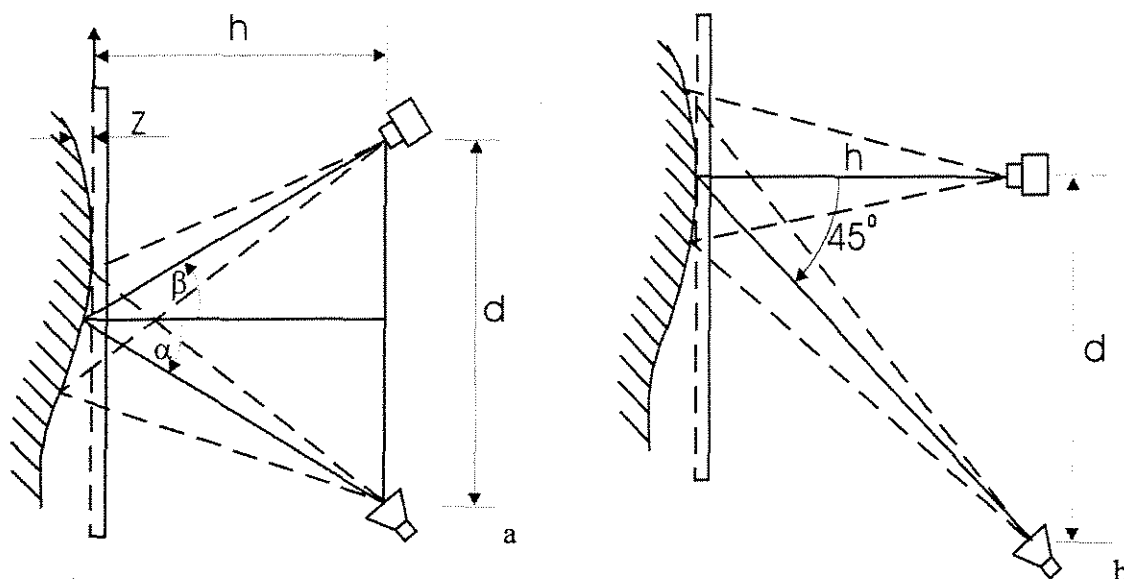


Figura 9: Arranjo experimental para *Moiré* de sombra com luz não colimada. a. Com observador posicionado obliquamente em relação ao retículo de referência. b. Com observador posicionado perpendicularmente em relação ao retículo de referência.

Fonte: POST, HAN & IFJU (1994).

Para observador e câmera posicionados obliquamente ao retículo de referência é válida a relação expressa pela Equação (17) abaixo:

$$\tan \alpha + \tan \beta = d / h \quad (17)$$

em que:

d = distância entre a fonte de luz e o observador

h = distância entre o observador e o retículo de referência

substituindo-se a Equação (17) na Equação (14), temos:

$$z = \frac{Np}{d/h} \quad (18)$$

ou

$$z = \frac{Nph}{d} \quad (19)$$

3.9.3. Determinação das diferenças de cota para as técnicas de *Moiré* de projeção.

Assim como as técnicas de *Moiré* de sombra, as técnicas de *Moiré* de projeção também são utilizadas para o estudo da topografia de superfícies e determinação de deslocamentos fora do plano. Nas técnicas de *Moiré* de projeção, o retículo do modelo é projetado sobre a superfície do corpo a ser analisado. A imagem do retículo projetado é então registrada através de fotografia.

Para obtenção das franjas de *Moiré*, esta imagem é então digitalizada e sobreposta à imagem do retículo de referência que pode ser virtual, isto é, gerado em computador ou uma fotografia do mesmo retículo projetado sobre a mesma superfície plana onde o objeto é posicionado.

Segundo CLOUD (1998), a diferença de cota ($\Delta z = z_1 - z_2$) entre dois pontos localizados na superfície do corpo a ser analisado é dada pela seguinte equação:

$$\Delta z = \frac{Np}{\text{sen } \alpha} \quad (20)$$

em que:

α = ângulo de projeção da grade sobre o objeto a analisar.

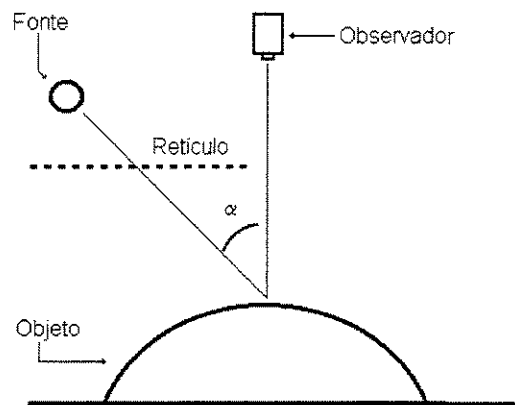


Figura 10: Arranjo experimental para *Moiré* de projeção.

Fonte: LINO (2002).

3.10. Aplicações da Técnica de *Moiré* de Sombra.

WINDISCHBAUER (1982) afirma que a topografia de *Moiré* é uma moderna ferramenta científica para medição, análise, e descrição matemática de formas tridimensionais de objetos biológicos, com a capacidade de minimizar os riscos de danos e doenças, por se tratar de método ótico não invasivo.

POST, HAN & IFJU (1994), afirmam que o método de *Moiré* de sombra determina a topografia da superfície de um espécime. Na mecânica, este método é utilizado para medir a variação ocorrida na topografia de uma superfície plana causada por carregamento, temperatura, umidade, idade ou outras variáveis e na metrologia, é utilizado para a determinação da forma de corpos tridimensionais.

TAKASAKI (1970), utilizou a topografia de *Moiré* para obter os contornos de um manequim, colocando à sua frente um retículo com período de 1mm construído de linhas de pescar de nylon com diâmetro de 0,45 mm.

Para iluminação do manequim, foram utilizadas duas lâmpadas de 500 watts, posicionadas lateral e simetricamente a uma distância de 500 mm da câmera fotográfica utilizada para registrar as imagens sendo estas posicionadas a uma distância de 2000 mm do retículo de referência.

Os resultados obtidos com tal arranjo experimental podem ser vistos na Figura 11, abaixo, onde as franjas de *Moiré* possuem cotas distanciadas de aproximadamente 4 mm.

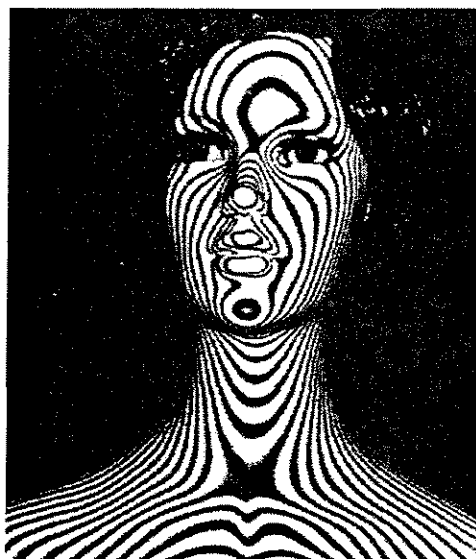


Figura 11: Franjas de *Moiré* mostrando os contornos topográficos de um manequim.

Fonte: TAKASAKI (1970).

Já TAKASAKI (1973), ainda realizando experimentos com manequins, concluiu que a acurácia da técnica, quando corrigidos os contornos de *Moiré*, é de 0,02%, e que a mesma depende exclusivamente das distorções da lente da câmera.

NEUGEBAUER & WINDISCHBAUER (1982), também usaram técnica para pesquisar escoliose na coluna vertebral projetando um retículo nas costas de um paciente, cuja imagem foi registrada e sobreposta ao retículo de referência de modo a gerar os padrões ou franjas de *Moiré*. A partir da imagem das franjas geradas nas costas do paciente, produziu através de computador, um topograma de *Moiré* corrigido, cujo resultado pode ser visto na Figura 12. Este topograma possibilitou gerar uma curva de rotação das vértebras (curva

CMCT). Esta curva se mostrou equivalente à curva de rotação das vértebras da coluna do paciente, produzidas por imagens de raio X.

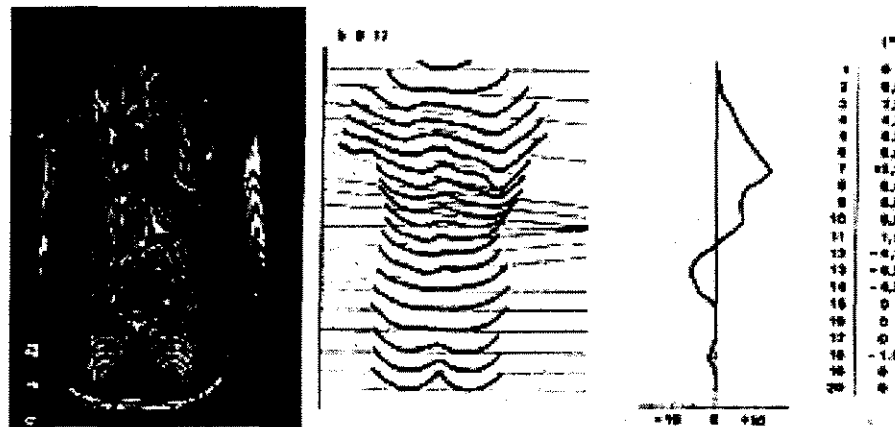


Figura 12: Topograma de *Moiré*, e curva CMCT das costas de paciente com escoliose idiopática.

Fonte: NEUGEBAUER & WINDISCHBAUER (1982).

No mesmo ano, KATSUKI et al. (1982), quantificaram a simetria do nariz humano usando topografia de *Moiré*. Através das imagens de uma face contendo as franjas de *Moiré*, calcularam os índices de simetria antes e após cirurgia facial. Comparando estas de linhas entre si e com a linha ideal, puderam então avaliar os resultados da cirurgia. Os resultados obtidos por estes pesquisadores podem ser observados na figura 13.

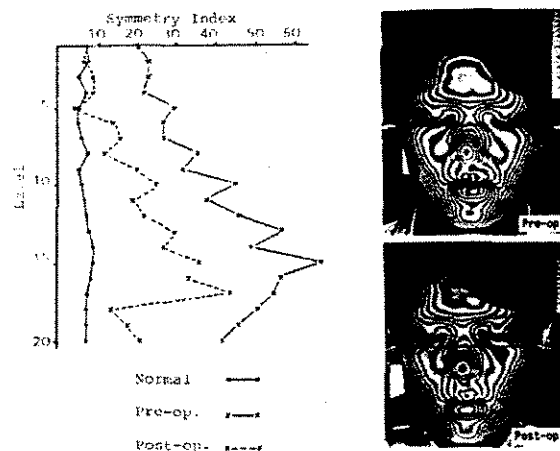


Figura 13: Mudança nos contornos de *Moiré* e índice de simetria do nariz antes e após cirurgia.

Fonte: KATSUKI et al. (1982).

WINDISCHBAUER (1982), fazendo uma revisão do “estado de arte” da técnica de *Moiré* de sombra aplicado à biologia e medicina, cita seu uso em trabalhos que testaram as funções da retina, na determinação do centro de rotação de juntas humanas, na medição da curvatura da córnea e na pesquisa de escoliose da coluna vertebral humana.

DIRCKX, DECRAEMER & DIELIS (1988), desenvolveram um método chamado método da mudança de fase “phase shifting method” baseado em *Moiré* de sombra, para a reconstrução de superfícies 3D. Neste método experimental, são tomadas imagens do objeto ou alvo com as franjas de *Moiré* sendo que entre cada registro da imagem, o objeto foi aproximado ou afastado do retículo distâncias de fração do seu período. Após a digitalização estas imagens foram subtraídas e através de um programa computacional a reconstrução da superfície do objeto foi obtida.

Um sistema de visão computadorizada, empregando imagens de *Moiré*, também utilizado para diagnosticar doenças da coluna de pacientes humanos, foi desenvolvido por BATOUCHE, BENLAMRI & KOLLADI (1996). Este sistema extrai as franjas de contorno das imagens de *Moiré*, localizando alguns elementos anatômicos, coluna e espáduas, com os quais gera a superfície 3D das costas dos pacientes e, a partir de parâmetros médicos, produz o diagnóstico.

ASSUNDI & YUNG (1991), afirmam que essa técnica é também utilizada nas linhas de produção industriais para identificar a forma e defeitos dos produtos.

ZWEMER et al. (2000) e WANG & HASSELL (2000) usaram a técnica de *Moiré* de sombra para inspeção automática de circuitos impressos nas linhas de produção.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - INNOVATION DESERVING EXPLORATORY ANALYSIS PROGRAM (2000) , citada por LINO (2002), desenvolveram um protótipo de um sistema, não convencional e não destrutivo, para avaliação de superfícies de pavimentos usando a técnica de *Moiré* de sombra associado a um avançado sistema de vídeo controlado por computador e tecnologia de processamento de imagens. Esse protótipo grava as imagens de *Moiré* de alta resolução, à medida que transita pela estrada a uma velocidade de 48 a 65 km/h. A imagem é levada uma central onde é

analisada e pode determinar o estado do pavimento e a magnitude dos danos que possa ter sofrido.

3.11. Métodos para Aumentar a Sensibilidade das Técnicas de *Moiré*.

GASVIK (1983) afirma que a sensibilidade das técnicas de *Moiré* pode ser aumentada através de vários métodos, dentre eles os métodos de interpolação e multiplicação de franjas, técnicas de grades desencontradas (mismatch techniques) e mudança de fase.

O método de interpolação de franjas consiste em determinar as franjas de ordem fracionária, como por exemplo, 1/2 franja, 1/4 de franja. Esta franja de ordem fracionária pode ser medida pela intensidade da luz em cada ponto da imagem.

A multiplicação de franjas é um método muito robusto, produz um maior número de franjas de *Moiré* e contorna as dificuldades causadas pela variação da intensidade da iluminação ao longo do objeto em estudo, principalmente na técnica de *Moiré* de sombra.

O método de multiplicação de franjas, consiste em obter duas imagens das franjas de *Moiré* defasadas uma da outra de " π ", ou seja, meio período da franja de *Moiré*, de maneira que a posição das franjas claras e escuras se invertam, ou seja, no local onde existe uma franja clara na primeira imagem, na segunda existirá uma franja escura, fazendo com que as imagens sejam uma o inverso da outra como mostrado na figura 14.

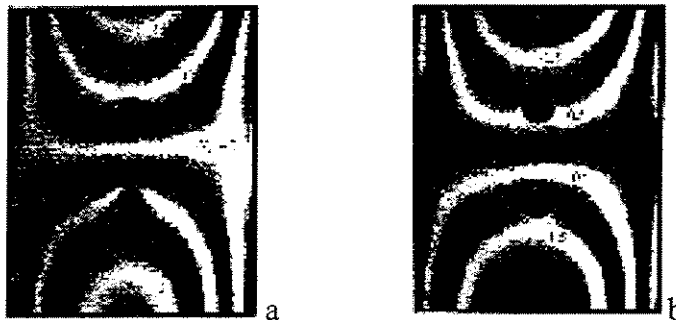


Figura 14: Franjas de *Moiré*. a) Imagem normal. b) Imagem defasada em meio período.

Fonte: POST, HAN & IFJU (1994).

As imagens são então subtraídas uma da outra, calculando-se o seu módulo e obtendo-se uma imagem com o dobro de franjas de *Moiré* que as duas imagens iniciais. Segundo LINO (2002) a imagem é então truncada, ou seja binarizada, atribuindo-se 0 (zero) à intensidade luminosa com valores próximos de 0 (escuro) e valores próximos de 256, (por exemplo 255) para os demais valores proporcionando o estreitamento das franjas de *Moiré*, o que facilita a sua digitalização, além de eliminar qualquer tipo de ruído.

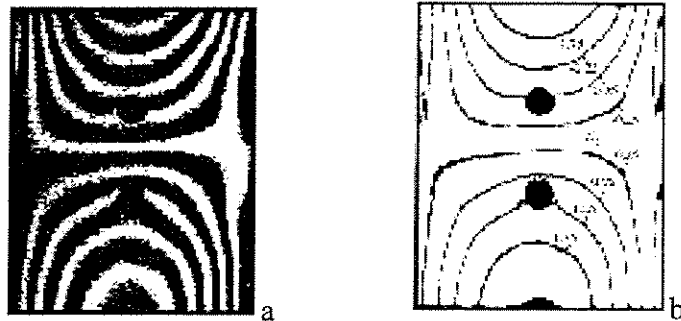


Figura 15: Franjas de *Moiré*. a) Padrão obtido pelo módulo da subtração das figuras 13a e 13b. b) Contornos afinados através da binarização das franjas da figura 14a.

Fonte: POST, HAN & IFJU (1994).

A figura 16 mostra esquematicamente o método de multiplicação de franjas sendo na figura 16a o padrão original das franjas de *Moiré* sobreposto à sua imagem inversa, na figura 16b o padrão obtido pela subtração da imagem original de sua inversa, na figura 16c o valor absoluto, ou seja, o módulo da subtração e a indicação das regiões de truncamento, e finalmente na figura 16d, o truncamento ou binarização, relativos às das franjas da figura 16c.

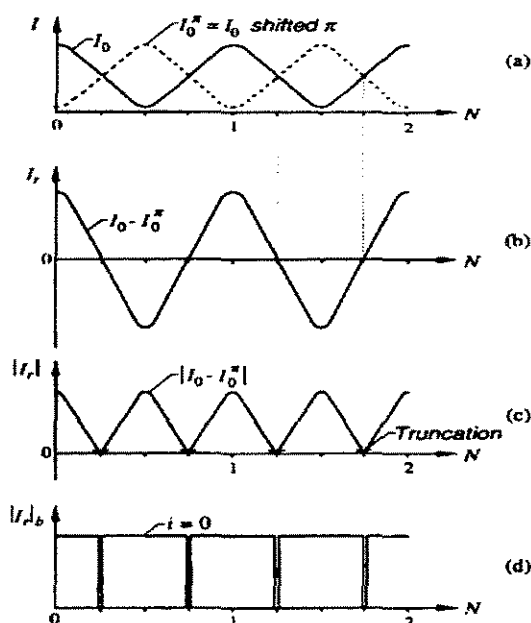


Figura 16: Representação esquemática do método de multiplicação de franjas.

Fonte: POST, HAN & IFJU (1994).

No caso específico das técnicas de *Moiré* de sombra, o método das grades desencontradas, não pode ser utilizado, pois existem diferenças entre retículo do modelo e o retículo de referência devido ao fato de possuírem períodos diferentes e ou terem seus eixos rotacionados um em relação ao outro.

DIRCKX & DECRAEMER (1990), desenvolveram uma técnica utilizada para a reconstrução automática da superfície tridimensional de objetos, chamada de mudança de fase (Phase shifting), na qual utilizaram 4 imagens das franjas de *Moiré* de sombra da superfície de um objeto, sendo que para o registro de cada imagem, o objeto foi aproximado ou afastado do retículo de referência uma distância tal que, juntamente com outras variáveis do arranjo experimental, fizeram com que as franjas de *Moiré* se deslocassem por frações de seu período (0 , $\pi/2$, π , e $3\pi/2$) em relação à primeira imagem.

Após a digitalização, estas imagens foram subtraídas e através do uso de programas computacionais a reconstrução da superfície foi obtida.

A aplicação deste método, conferiu uma resolução, na prática, aproximadamente dez vezes maior que a simples medição de franjas para o arranjo experimental utilizado, além de proporcionar também maior rapidez à técnica de *Moiré* de sombra e ainda ser capaz de determinar automaticamente a concavidade e a convexidade de superfícies.

SU & CHEN (2001), citam que o Método da Mudança de Fase é utilizado por várias técnicas óticas tais como a Perfilometria por Medição de Fase (PMF), Perfilometria por Transformada de Fourier (PTF), Perfilometria por Medição de Modulação (PMM), Detecção Espacial de Fase (DEF), Projeção de Franjas de Cores Codificadas (PFCC).

Segundo WANG (2000) apud LINO (2002), para a aplicação do método de mudança de fase à técnica de *Moiré* de sombra, são necessárias 4 imagens das franjas de *Moiré* sendo que em cada uma delas o corpo em estudo deve ser aproximado ou afastado do retículo de referencia de maneira a produzir deslocamentos de fase das franjas de *Moiré* da ordem $1/2 \pi$, π e $3/2 \pi$.

A intensidade luminosa em cada uma das imagens pode ser descrita pelas equações 21 a 24:

$$I_1(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos \phi(x, y) \quad (21)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi / 2 + \phi(x, y)] \quad (22)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi + \phi(x, y)] \quad (23)$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[3\pi / 2 + \phi(x, y)] \quad (24)$$

em que:

$a(x, y)$ = intensidade luminosa do fundo em cada ponto da imagem.

$b(x, y)$ = intensidade de modulação em cada ponto da imagem.

ϕ = fase a ser determinada.

Resolvendo as 4 equações simultaneamente, pode se obter o termo fase para cada ponto da imagem:

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{(I_4(x, y)) - (I_2(x, y))}{(I_1(x, y)) - (I_3(x, y))} \right] \quad (25)$$

O cálculo da fase é feito automaticamente através de programas computacionais e resulta em valores que variam de $-\pi$ a π , motivo pelo qual, a imagem resultante é chamada de mapa de fases empacotadas.

A Figura 17 mostra a seqüência de imagens do processo de mudança de fase.

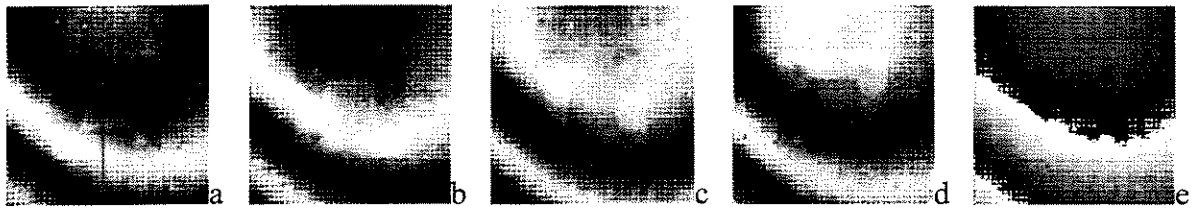


Figura 17: Método da mudança de fase. a. Imagem inicial. b. Imagem com fase de franja mudada $\pi/2$ c. Imagem com fase de franja mudada π d. Imagem com fase de franja mudada $3/2 \pi$ e. Mapa de fases empacotadas. Fonte: WANG, (2001) apud LINO, (2002).

A imagem gerada através dos programas computacionais chamada mapa de fases empacotadas, possui descontinuidades que necessitam ser removidas por um processo chamado desempacotamento de fase (Phase unwrapped).

SOILLE (2000), cita que o processo de desempacotamento de fase não é um processo trivial e pode apresentar erros devido a ruídos eletrônicos e speckle, presença de formas arbitrárias como furos e cantos, mudanças de fase abruptas devido a descontinuidades maiores que π e ainda regiões com baixa modulação.

A Figura 18 mostra o perfil de um objeto com mapa de fases empacotadas e o mesmo perfil com as fases desempacotadas.

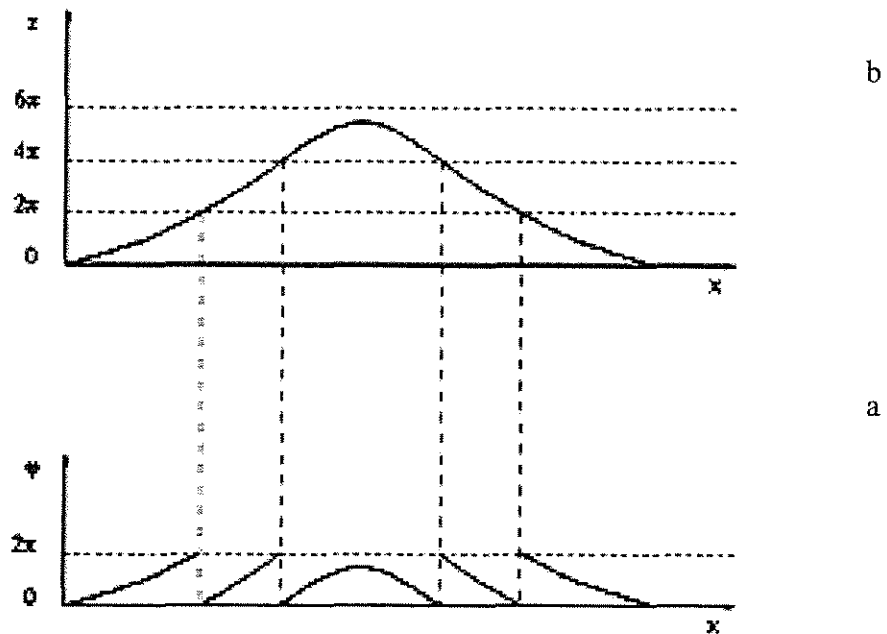


Figura 18: Desempacotamento de fases. a. Perfil de um objeto com mapa de fases empacotadas. b. Perfil do mesmo objeto com mapa de fases desempacotadas.

Fonte: LINO (2002).

3.12. Sensibilidade e Exatidão da Técnica de *Moiré* de Sombra.

Para as técnicas de *Moiré* de sombra, que são utilizadas para medir deslocamentos fora do plano, os ângulos de iluminação e observação em relação à linha normal ao retículo de referência, além da sua própria frequência, também interferem na sensibilidade

MOORE & TRUAX (1979), afirmam que a exatidão para a técnica de *Moiré* de sombra é de no máximo 1/10 do período da franja de *Moiré* gerada, porém estes mesmos pesquisadores, desenvolveram um método chamado “phase locked”, baseado no método de *Moiré* de sombra, cuja exatidão é maior que 1/20 do período da franja de *Moiré* gerada.

DIRCKX & DECRAEMER (1990), afirmam que a exatidão do sistema depende da calibração do arranjo experimental, e que é possível saber perfeitamente qual a distância entre 2 franjas de *Moiré*.

SHAPIRA & VOLOSHIN (1992), desenvolveram um método baseado em *Moiré* de sombra, que utilizando luz branca, pode medir a geometria de faces e corpos humanos, bem como deformações fora do plano em estruturas carregadas. O resultado obtido mostrou um erro médio menor que 2%.

TAKEDA & MUTOH (1983), propuseram e verificaram através de experimentos uma nova técnica para medição automática de formas tridimensionais chamada Perfilometria por Transformada de Fourier (FTP). Em contraste com as técnicas de contorno de *Moiré*, o padrão de grades projetado sobre a superfície do objeto é transformado por Fourier e processada no domínio de sua frequência espacial.

Esta técnica possui sensibilidade muito maior que as técnicas convencionais de *Moiré* e é capaz de distinguir automaticamente as depressões das elevações na superfície do objeto além de não requerer a identificação dos contornos e das ordens das franjas, bem como a interpolação dos dados na região entre 2 franjas contíguas.

3.13. Utilização das Técnicas de *Moiré* para Medições de Objetos em Movimento.

Baseado nos princípios da Perfilometria por Transformada de Fourier, desenvolvidos por TAKEDA & MUTOH (1983), Optons Company desenvolveu sistemas óticos de medição automática de formas tridimensionais de objetos, usando as técnicas de *Moiré*.

Os sistemas chamados de "*Moiré* 3D Câmera" projetam sobre o objeto a analisar, um padrão de grades e quando este sofre deformações, a imagem é registrada e enviada a um computador através de uma câmera CCD que processa as informações através do método da Perfilometria por Transformada de Fourier .

No equipamento desenvolvido, projetor e a câmera estão dispostos de maneira a formar um ângulo entre si, o que provê o contraste entre as imagens e minimiza a influência da distorção das lentes, possuindo também 3 pontos de laser utilizados para o foco automático da câmera, uma fonte de luz branca para iluminar o objeto e ainda um sistema de deslocamento da grade aproximando ou distanciando-a do objeto

A maneira convencional de medição de forma de objetos em movimento, consiste em inserir marcações nas superfícies destes e quando em movimento, registrar as imagens deste objeto através de câmeras de alta velocidade e compará-las com imagens do objeto em repouso. Este método é passível de aplicação apenas para medição e duas dimensões.

A figura 19 mostra o fluxograma de funcionamento do equipamento "Moiré 3D Câmera".

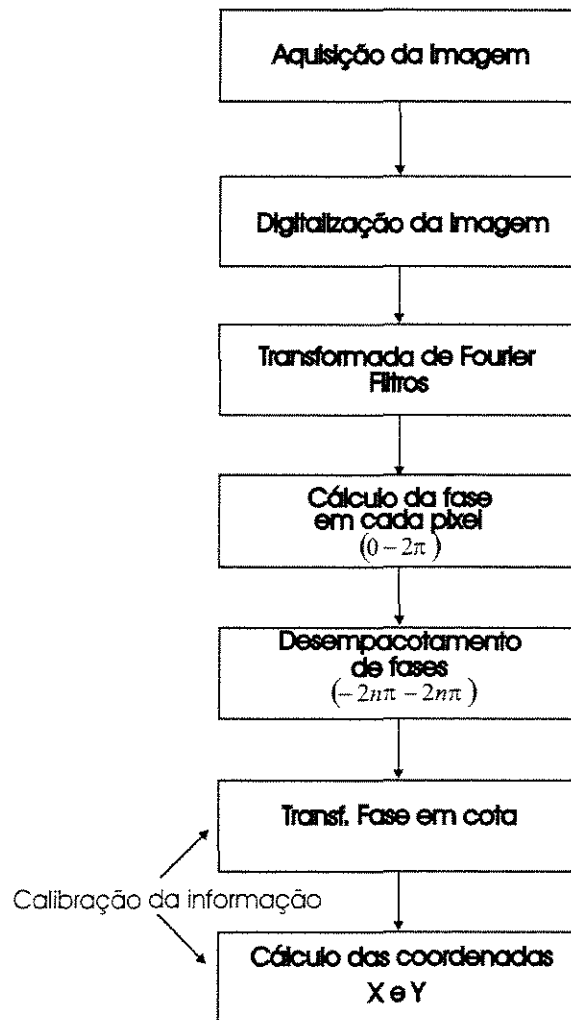


Figura 19:Princípio de funcionamento das "Moiré 3D Câmera".

Fonte: Optons Company.

A utilização do sistema chamado "*Moiré 3D Câmera*" permite a medição da forma tridimensional de objetos em movimento automaticamente, por possuir o projetor com fonte de luz estroboscópica.

A figura 20, mostra o arranjo utilizado para medições através do equipamento "*Moiré 3D Câmera*".

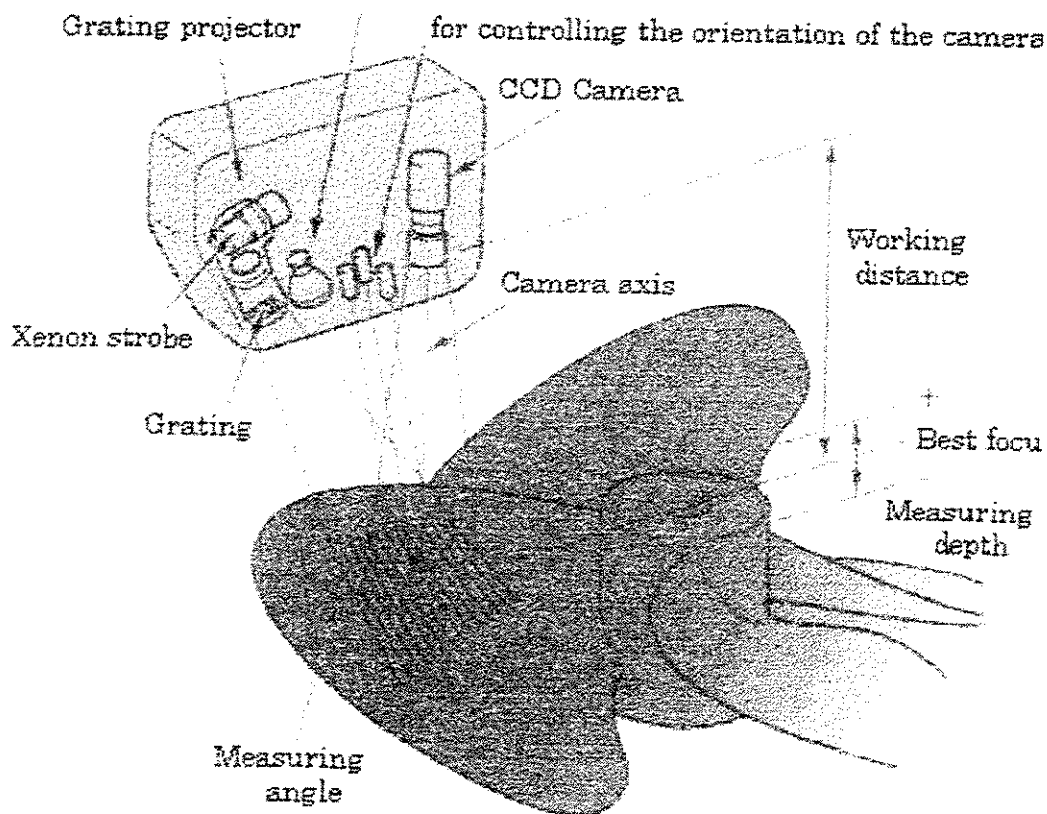


Figura 20: Esquema de medições utilizando as "*Moiré 3D Câmera*".

Fonte: Optons Company.

3.14. A Cultura da Cana-de-Açúcar.

Ocupando uma das primeiras colocações no ranking das espécies mais plantadas nas zonas tropicais e equatorial do globo terrestre, a cana-de-açúcar, que cobre extensas regiões na Ásia, Austrália, África e em praticamente todo o Continente Americano, tem 93% da produção mundial concentrada em países em desenvolvimento sendo o Brasil o maior produtor mundial respondendo por aproximadamente 25% de toda a produção, TRINDADE (1997).

Como uma das mais importantes culturas agrícolas para a economia do Brasil, desde o período colonial a cana-de-açúcar vem sendo largamente cultivada no país, desenvolvendo-se primeiramente na região nordeste tendo migrado para a região centro-sul a partir metade do Século XX como consequência, dentre outros fatores, da Segunda Guerra Mundial que interrompeu o comércio de cabotagem entre as duas regiões.

A partir dessa época, tendo aqui encontrado condições agrícolas e industriais favoráveis, RAMOS (1999), a cultura da cana-de-açúcar desenvolveu-se rapidamente, tornando-se a mais expressiva cultura do Estado de São Paulo, posição ocupada ainda nos dias de hoje.

A cana-de-açúcar tem seu cultivo intimamente dependente das operações de corte, seja este manual ou mecanizado, sendo o setor sucroalcooleiro um dos mais mecanizados e ao mesmo tempo, que mais emprega mão-de-obra no Estado de São Paulo.

3.14.1. A colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

O princípio da mecanização do corte da cana em São Paulo em escala comercial situa-se no início dos anos 1970, RÍPOLI (1981), sendo esse processo sempre lento e de pequena dimensão quando a grande maioria das usinas e destilarias colhia apenas um pequeno percentual da produção empregando máquinas colhedoras.

Segundo VEIGA FILHO (2002), a lenta adoção do corte mecanizado era influenciada tanto por fatores do lado da demanda, compreendidos pelos custos dos sistemas de corte, nível de rentabilidade setorial e valor dos investimentos, como por fatores situados no lado da oferta

da tecnologia, que abarcam a eficiência técnica, complementaridades tecnológicas, capacitação, legislação e limitações físicas de solo e clima.

Conforme dados de VEIGA FILHO (2002), em 1988/89 a área de corte mecânico no Estado de São Paulo foi de 98,6 mil hectares e a área de corte manual abrangeu 1.123,7 mil hectares, significando respectivamente 8% e 92% da área plantada sendo que após uma década, na safra 1997/1998, a área de corte mecânico evoluiu para 172,8 mil hectares, correspondendo a 18% da área colhida e na safra 1999/2000 a área colhida por máquinas aumentou para 426,3 mil hectares correspondendo a 29% da área total.

Em termos absolutos, a área colhida por máquinas nos 11 anos cobertos pelo levantamento realizado por VEIGA FILHO (2002) aumentou 332% como também aumentou a relação de colheita de cana crua / cana queimada, passando a primeira a responder por 55% da área total colhida. Considerando também que o percentual de área colhida mecanicamente representava na safra 1999/2000 tão somente 29% da área total, o potencial para aumento do corte mecanizado no Estado de São Paulo nos próximos anos ainda é gigantesco, correspondendo a três vezes o realizado naquele ano.

Ainda segundo VEIGA FILHO (2002), uma das principais causas do aumento da participação da colheita mecanizada da cana no Estado de São Paulo, foi a evolução técnica acentuada ocorrida na década de 1990 com a incorporação de tecnologias que possibilitaram otimizar o uso das máquinas, pelo aumento da eficiência nos vários sistemas que a estruturam, possibilitando um aumento na colheita de 594 ha/máquina na safra 1988/89 para 1.093 ha/máquina na safra 1999/00 o que corresponde a 84%.

Segundo VOLPATO (2001), muito se tem pesquisado no Brasil sobre a colheita mecânica de cana-de-açúcar, entretanto, ainda existe um grande dilema que é saber qual a melhor opção entre colher a cana inteira ou picada em função das vantagens e desvantagens que cada sistema apresenta. Existem no mercado nacional máquinas para ambas modalidades sendo a escolha feita em função das particularidades de cada usina.

3.14.2. Mecanismos de corte.

Segundo ODUORI, GUPTA & SAKAI (1992), apesar de ser a cultura da cana muito difundida em todo o mundo, informações sobre o mecanismo usado nas colhedoras mecânicas

para o corte de base são difíceis de ser encontradas, afirmando também, que os cortadores comumente usados em máquinas agrícolas, tipicamente executam uma combinação dos movimentos alternativo e de translação, ou então, uma combinação dos movimentos rotativo e de translação.

No primeiro caso situam-se as barras de corte alternativas e no segundo caso, situam-se os discos de corte rotativos.

3.14.3. Barras de corte alternativas.

A barra de corte consiste de uma barra móvel acionada por um sistema biela manivela que lhe confere movimento alternativo, na qual estão fixadas lâminas que funcionam como facas, e por uma segunda barra, fixa, à qual estão solidárias as contrafaças. O corte é realizado pela composição do movimento da barra e do movimento de avanço da máquina. A velocidade de avanço é dada pelo deslocamento da máquina no campo.

Apesar de largamente utilizada em diversas culturas, a barra de corte não é apropriada ao corte de base de cana-de-açúcar, em função da ordem de magnitude de flexão que sofrem os colmos antes do corte. A flexão longitudinal é função da velocidade de deslocamento da colhedora e a flexão transversal da distância entre dentes da barra de corte.

Dependendo da velocidade de deslocamento e da rotação da máquina, a flexão longitudinal que sofrem os colmos pode chegar a 20cm, o que provocaria enormes danos por arrancamento de soqueira.

3.14.4. Discos de corte rotativos.

Os dispositivos mais largamente empregados para o corte basal de cana-de-açúcar são os discos de corte rotativos.

Segundo ODUORI, GUPTA & SAKAI (1992), os discos de corte se dividem em duas categorias sendo a primeira, aquela em que o bordo cortante se move em um plano perpendicular ao eixo de rotação e a segunda, aquela em que o bordo cortante descreve um cilindro sobre o eixo de rotação. A primeira categoria de discos de corte rotativos pode ainda ser subdividida em duas subcategorias, sendo a primeira, aquela em que o bordo cortante é

contínuo e formado na periferia do disco, como no caso de discos de corte liso e serrilhado e a segunda categoria aquela formada por discos ou outras formas de mecanismos rotativos com lâminas ou facas na periferia.

Apesar de haver notícias de uso de discos de bordo serrilhado na Índia, o mecanismo predominante no corte basal de cana-de-açúcar é a segunda sub categoria, ou seja, o disco de corte com lâminas radiais acopladas.

Segundo GUPTA & ODUORI (1992), os discos de facas rotativas usam o princípio do corte inercial no qual também é baseado o corte manual de cana-de-açúcar, sendo este o princípio aplicado em vários modelos de colhedoras de cana existentes no mercado.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas acerca da colheita mecanizada de cana-de-açúcar, e, enormes têm sido os avanços tecnológicos incorporados às máquinas colhedoras, entretanto, o princípio, os mecanismos e as ferramentas ativas de corte, evoluíram pouco desde o início da mecanização em escala comercial da colheita de cana-de-açúcar no princípio da década de 1970, até o presente momento., sendo que o cortador de disco duplo utilizado para o corte basal nas colhedoras de cana picada, apresenta um desempenho de varredura insatisfatório, sendo o ajuste da altura de corte, um compromisso entre a qualidade e as perdas de matéria prima, BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002) e principal fator na geração de contaminação e perdas de matéria prima NEVES et al. (2001).

As pesquisas mais importantes estão divididas em duas grandes linhas, sendo a primeira direcionada à quantificação e redução da energia consumida nas operações de corte e a segunda, na determinação e controle dos parâmetros dos dispositivos de corte, visando o acompanhamento do perfil do solo a fim de reduzir as perdas e principalmente a contaminação da matéria prima.

No primeiro caso, CHANG, MAZIERO & BERNARDI (1982), utilizaram o pêndulo duplo para quantificar a energia consumida no corte de colmos de cana-de-açúcar, verificando que a diferença entre a energia requerida por um cortador de base comercial chega a ser três vezes superior à requerida pelos cortadores manuais afiados.

Resultados apresentados por KROES & HARRIS (1996a), que estudaram os efeitos de quatro formatos diferentes de lâminas em um cortador basal de cana-de-açúcar, e dos seus respectivos ângulos de inclinação, oblíquo, de afiação e também a espessura da faca, permitem

concluir que seus efeitos sobre a demanda total de energia dos cortadores basais instalados nas colhedoras de cana-de-açúcar são insignificantes visto que a energia necessária ao corte de um colmo é de 13J, KROES & HARRIS (1996).

Considerando estes dados, BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002) afirmam que a demanda de potência do cortador de base para apenas cortar os colmos da cana é da ordem de 390W, mas que na realidade, são instalados neste sistema potências superiores a 75KW que é grandemente consumida pela movimentação do solo.

Ainda sobre as pesquisas de KROES & HARRIS (1996), BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002), fazem duas importantes considerações:

1. “os trabalhos orientados à redução da força e da energia de corte, otimizando ângulos, materiais ou espessura das facas, têm impacto desprezível na demanda total de potência do cortador”;

2. “existe um potencial importante de redução de investimento e custo operacional das colhedoras, se a potência instalada para o corte de base, em termos de motor de combustão interna e componentes hidráulicos como bombas, motores, válvulas, tubulações, reservatórios e filtros, for dividida por um fator de 10 ou 20, através de uma tecnologia de seguimento ou varredura o perfil que evite a penetração das facas no solo”.

No segundo caso, pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de desenvolver mecanismos que possibilitem ao cortador de base acompanhar o perfil do solo automaticamente, sendo que os mecanismos que atuam no sistema hidráulico propostos por BOAST (1986), MUSUMECI & BITMEAD (1991), RAFULL & ALVAREZ (1999) e LOPES (2000), apud VOLPATO (2001), os mais comumente testados, mas apresentando sempre resultados insatisfatórios em função normalmente dos tempos de reposta que são muito elevados em função da velocidade de avanço das máquinas. Os dispositivos baseados no alcance ultrassônico, GARSON (1992) e GARSON & ARMSTRONG (1993), apud VOLPATO (2001), se mostraram mais promissores, porém ainda não apresentam utilizações práticas. Estes sistemas são tidos como ativos pois utilizam fonte de potência auxiliar, normalmente hidráulica, para efetuar o posicionamento do mecanismo, BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002).

VOLPATO (2001), modelou e estudou um sistema de quatro barras para sustentação do cortador de base e seguimento do perfil do solo, porém, em função do número de variáveis envolvidas, o uso de recursos de simulação e otimização é necessário para tornar o seu desempenho satisfatório

Também visando um maior controle do acompanhamento do perfil do solo, o Centro Tecnológico da Copersucar em Piracicaba – SP desenvolveu e testou um sistema de corte flutuante em uma colhedora Austoft A7700 na safra 00/01 tendo diminuído significativamente os índices de impurezas captados e partes de soqueira arrancadas, todavia não apresentando melhora em relação aos tocos remanescentes no campo, quando comparado aos cortadores convencionais, NEVES et al. (2001).

Estes sistemas são tidos como passivos, não sendo alimentada energia elétrica ou hidráulica ao mecanismo, pois o sistema é posicionado nos movimentos ascendentes pela força de reação do solo e nos descendentes pela ação de seu peso próprio.

Apesar dos estudos atuais serem desenvolvidos com o objetivo de minimizar as perdas e contaminação de matéria bem como o consumo de energia das máquinas cortadoras, existem limitações intrínsecas no princípio operacional do cortador de discos rígidos que impedem a redução dos níveis de contaminação abaixo dos praticados nos dias de hoje, sendo necessário a concentração de esforços na pesquisa de mecanismos alternativos que evitem a captação de impurezas, BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002).

3.14.5. Perdas e contaminação de matéria prima no corte mecanizado.

Vários autores citam o cortador de base da colheita mecanizada da cana como o maior causador de perdas e principalmente de contaminação da matéria prima entregue na usina.

Segundo RIDGE & DICK (1988), as perdas provocadas pelo corte basal da cana podem ser diretas ou indiretas. No primeiro caso refletem as perdas de açúcar e matéria prima ocorridas diretamente no corte e no segundo, pelo recolhimento e transporte de impurezas minerais que tem reflexo na redução da eficiência industrial.

COPERSUCAR (1988) apud VOLPATO (2001), classifica as perdas de matéria prima em visíveis e invisíveis. No primeiro caso, situam-se as perdas passíveis de serem detectadas em campo, representado pelas canas inteiras, toletes, pedaços de cana, ponteiros, tocos, canas esmagadas ou perdidas no campo ou na colhedora. As perdas invisíveis são constituídas por estilhaços e fragmentos de colmos que se desprendem durante a ação dos mecanismos de corte e picagem da colhedora, sendo lançados e misturados ao solo, dificultando sua observação e quantificação no campo.

Segundo NEVES et al. (2001), que avaliaram o dispositivo flutuante desenvolvido pelo Centro Tecnológico da Copersucar, o mesmo trabalha automaticamente quando as ondulações são menores que 100mm, reduzindo a contaminação por matéria estranha na cana a ser transportada, reduzindo a quantidade de tocos remanescentes no campo, os danos à soqueira, os custos de manutenção pelo menor consumo de facas e também menor custo de combustível. Ainda segundo NEVES et al. (2001), que comparam o sistema flutuante com o sistema fixo, os melhores resultados foram obtidos em relação à quantidade de matéria estranha incorporada à cana (243%), o número e massa dos tocos arrancados do solo (190%). Com relação à quantidade de tocos remanescentes no campo, os resultados obtidos com o sistema flutuante foram apenas 10% inferiores ao sistema fixo, que segundo os resultados apresentados, ainda corresponde a 1,23 t/ha.

Segundo BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002), o cortador de disco duplo utilizado para o corte basal em colhedoras de cana picada, apresenta um desempenho de varredura insatisfatório, sendo o ajuste da altura de corte, um compromisso entre a qualidade e as perdas de matéria prima. Os pesquisadores citam como exemplo, o caso da configuração de um cortador de discos duplos com 675mm de diâmetro inclinados à 10°, em que a sua operação pode se dar em duas condições que levam a resultados antagônicos.

Na primeira, para se evitar contaminação da matéria prima por terra, o ponto de corte se dará a uma altura de 36mm do solo, restando ainda uma janela entre os discos e a superfície plana do solo de 62cm² onde não há varredura. Esta situação provoca altas perdas de matéria prima por tocos remanescentes e também por colmos inteiros ou fragmentos perdidos em função da área sem varredura, podendo ser agravada pela presença de depressões ou sulcos na linha de plantio.

Na segunda, o ponto de corte se dá rente ao solo, porém em função da penetração das facas no solo em uma área de 325cm^2 , ao final de 1ha colhido, sendo o espaçamento entre linhas de 1,5m, terão sido cortados 216 m^3 de solo, que além de provocar um desgaste nas facas muito superior ao requerido apenas para cortar os colmos, introduzirá uma grande contaminação por matéria mineral na cana que será transportada para a usina.

As perdas totais, diretas e indiretas, visíveis e invisíveis, causadas na colheita mecanizada de cana-de-açúcar em função do uso das tecnologias convencionais, principalmente no que diz respeito aos cortadores basais de discos rígidos, atingem 10% segundo VOLPATO (2001) e 7 a 15% segundo BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002).

Se aplicarmos essas taxas à área colhida mecanicamente no Estado de São Paulo em 99/00 de 426.388 há, VEIGA FILHO (2002), com uma produtividade média de 75 t/ha e o custo de produção da cana de US\$ 10,00/t, Nunes Jr. (2000), citado por BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002), os prejuízos do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo naquele ano ultrapassaram 140 milhões de reais.

3.15. Erros Experimentais.

CRUZ & FRAGNITO (1998), afirmam que ao se realizar medições, há sempre erros que as acompanham. As fontes de erros, fazem com que todas as medidas sejam afetadas por um erro experimental, por mais cuidadosas que sejam.

Os erros pertencem a dois grandes grupos sendo:

- Erros sistemáticos.
- Erros aleatórios.

Erros Sistemáticos, são aqueles que fazem com que as medidas feitas estejam consistentemente acima ou abaixo do valor real. As fontes deste tipo de erro são facilmente identificáveis, e, em princípio, podem ser eliminados ou compensados. Erros deste tipo prejudicam a exatidão da medida e podem ser devidos à utilização de instrumentos

descalibrados, métodos de observação inadequados, efeitos ambientais e simplificação de modelos teóricos.

Erros aleatórios são variações normais das medidas, para cima ou para baixo da média. Este tipo de erro afeta a precisão da medida e nem sempre é possível identificar as suas fontes. Alguns erros aleatórios são devidos ao julgamento feito pelo observador ao efetuar uma leitura abaixo da menor divisão de uma escala e flutuações ambientais não previsíveis.

Existem parâmetros que nos permitem verificar a qualidade ou consistência das medidas obtidas pelas técnicas experimentais de perfilometria.

- Resolução: Menores mudanças na topografia que o sensor pode captar e quantificar.
- Exatidão: Variações estatísticas entre medições repetidas de um valor conhecido.
- Repetibilidade: Capacidade de poder repetir as medidas.
- Sensibilidade ambiental: fatores ambientais que podem influenciar as medições.
- Velocidade: velocidade em que as medidas dos perfis são obtidas pelas técnicas.

WILLMOT et al. (1985), apud LINO (2002), afirmam que quando se relacionam valores obtidos por dois métodos de amostragem, ou ainda, valores observados e estimados, pode se ter informações sobre a precisão e exatidão destes valores, que conjuntamente indicam a consistência dos dados estimados com os medidos e também que a precisão é dada pelo coeficiente de correlação de Pearson (R^2) que indica apenas o grau de dispersão dos dados obtidos, ou seja, o quanto eles se ajustam a uma linha de tendência central. O coeficiente de correlação de Pearson considera apenas o erro aleatório.

Já a exatidão, erro sistemático, das medidas é quantificada numericamente pelo índice de concordância de Willmot (d), e indicam num gráfico de dispersão, ou 1/1, o quanto esses dados se ajustam a uma linha que, partindo da origem, divide o gráfico em duas partes iguais. O índice de concordância de Willmott (d) é determinado pela seguinte equação:

$$d = \frac{\sum (M - L)^2}{\sum [(M - \bar{L}) + (L - \bar{L})]^2} \quad 26$$

em que:

d = O índice de concordância de Willmott

M = Valores obtidos pela Técnica de *Moiré* de Sombra

L = Valores obtidos pelo paquímetro

\bar{L} = Média dos valores obtidos pelo paquímetro

A precisão é o grau de dispersão dos valores em torno da média. A Figura 21 apresenta a diferenciação entre a precisão e a exatidão das medidas, devido aos erros sistemáticos e aleatórios.

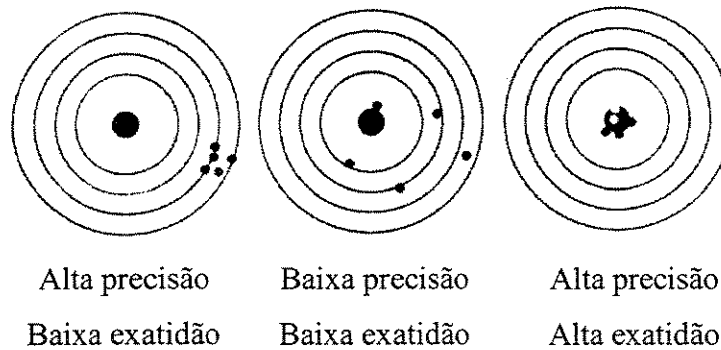


Figura 21. Representação da precisão e exatidão das medidas.

Fonte: LINO, 2002

Quando se usam valores medidos, portanto afetados por erros, para realizar cálculos, para se obter valor de outras grandezas, é necessário se conhecer como o erro original afeta a grandeza final, isto é, como os erros de medida afetam os cálculos.

Para o caso de somas ou subtrações de grandezas, o erro do resultado será dado pela raiz quadrada da soma do quadrado dos erros, assim sendo, uma soma ou subtração do tipo:

$$w = x \pm y \pm z \quad (27)$$

será afetada por um erro de valor:

$$\Delta w = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (28)$$

Para o caso de multiplicações ou divisões o erro relativo será dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros relativos de cada fator, então para uma equação do tipo:

$$w = \frac{x \pm \Delta x}{y \pm \Delta y} \quad (29)$$

e o erro relativo será dado por:

$$\frac{\Delta w}{w} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (30)$$

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Estudos Preliminares.

A fim de se verificar a capacidade da Técnica de *Moiré* de Sombra em captar as deformações de corpos em movimento, foram realizados estudos preliminares utilizando-se um disco de borracha em movimento giratório.

4.1.1 Arranjo experimental.

Para realização do experimento, um disco flexível de borracha foi acoplado a um motor elétrico e posicionado sobre uma superfície plana, de forma a coincidir seu centro com a origem de um sistema de coordenadas polares (x,y,z), previamente estabelecido. O plano de giro do disco também foi posicionado de forma a coincidir com o plano xy.

Para determinar a topografia do disco de borracha flexível submetido à flexão e em movimento giratório, foram utilizados retículos confeccionados pela técnica de fotolito em bureau de impressão especializado. Os retículos foram confeccionados com 450 x 450 mm e períodos de 0.4, 0.8, 1.2 e 2.0 mm.

Para evitar deformações nos retículos, estes foram colocados entre duas placas de vidro liso transparente de 3mm de espessura e fixados em um suporte que mantinha o conjunto a uma distância constante da superfície do disco.

Um disco de 300mm de diâmetro foi fabricado em manta de borracha de 5.3mm de espessura utilizando-se para o corte do mesmo o processo de corte à água, que garantiu a precisão dimensional.

Para possibilitar a visualização das franjas em função do uso de luz branca, o disco de borracha foi recoberto com um filme vinílico branco de forma a aumentar o contraste entre as franjas claras e escuras. O disco foi acionado no sentido horário por um motor elétrico a uma velocidade constante de 1.000 rpm durante todo o experimento.

Para provocar a flexão no disco durante seu movimento giratório, foi utilizada uma roldana com plano de giro perpendicular ao do disco, presa a uma haste ajustável. O ponto de contato entre a roldana e a superfície inferior do disco, foi fixado a uma distância de 130mm da origem do sistema, na posição 0° , sendo suas coordenadas (-130, 0, -5,4). Foi imposto ao disco cinco níveis de flexão diferentes, movimentando-se a roldana na direção positiva do eixo "z", posicionando-se sua tangente em 5, 10, 15, 20 e 25mm acima do plano da face inferior do disco como apresentado na figura 22.

Considerando que o ponto de contato entre a roldana e o disco foi posicionado a 130mm do centro e que o raio do disco corresponde a 150mm, os deslocamentos de 5, 10, 15, 20, e 25mm impostos pela roldana resultaram em elevações do bordo do disco de 5.8, 11.5, 17.2, 22.8 e 28.3mm respectivamente.

Todas as medidas relativas às cotas do ponto da tangente entre o disco e a roldana, bem como as cotas do bordo do disco foram tomadas com paquímetro digital MITUTOYO modelo CD20C com precisão de 0,01mm.

Um projetor de slides SAWYERS, modelo GRAND PRIX 570R, com lâmpada de 500 watts, foi utilizado como fonte de luz branca sendo posicionado obliquamente ao plano do disco a uma distância $d = 950\text{mm}$ da câmera fotográfica.

Para registrar as imagens do disco em movimento, foi utilizada uma câmera fotográfica digital da marca SONY, modelo MAVICA MVC - FD73 com resolução de 960 x 720 pixel, posicionada perpendicularmente ao plano de rotação do disco a uma distância, $h=1200\text{mm}$ como indicado no diagrama da figura 22, que mostra esquematicamente o arranjo experimental utilizado.

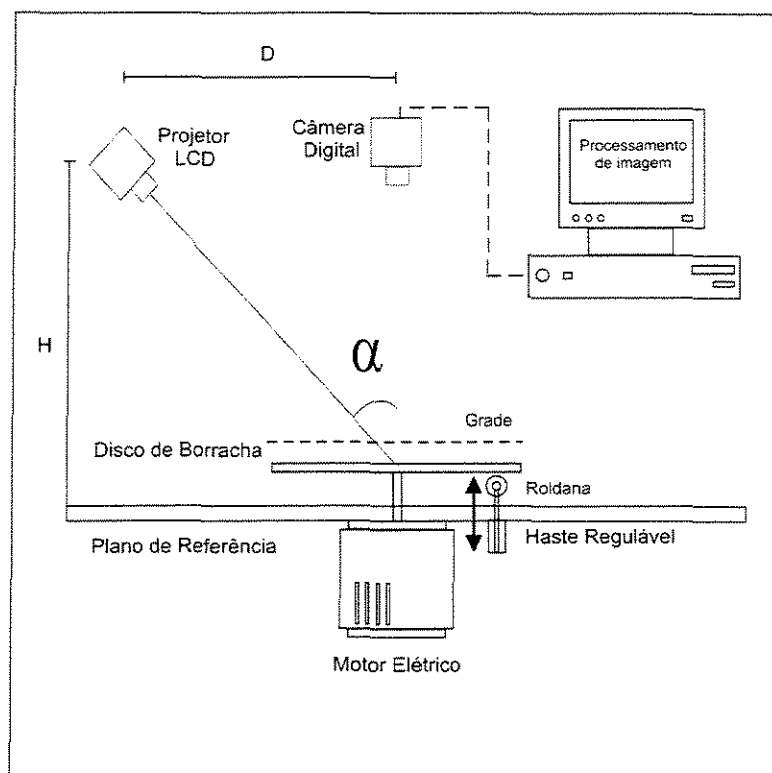


Figura 22. Arranjo experimental esquemático.

4.1.2. Obtenção e tratamento das imagens.

A fotografias dos padrões de franjas de cada nível de flexão imposta ao disco, foram tomadas em duas sessões, sendo a primeira em regime estático e a segunda em regime dinâmico.

Após a obtenção, as imagens dos padrões de franjas de cada nível de deformação do disco foram importadas para o programa de tratamento de imagens "COREL PHOTO PAINT" onde foram balanceadas e equalizadas a fim de diminuir o efeito do reflexo da luz na superfície do disco, que produz regiões mais claras, dificultando o reconhecimento automático das franjas de *Moiré*. Por fim foram tratadas com filtros de suavização e passa-baixa a fim de remover as linhas de grade e recortadas com máscara circular de forma a manter apenas os

contornos do disco e aumentar o contraste entre as franjas e a sua superfície como pode ser observado na figura 23.

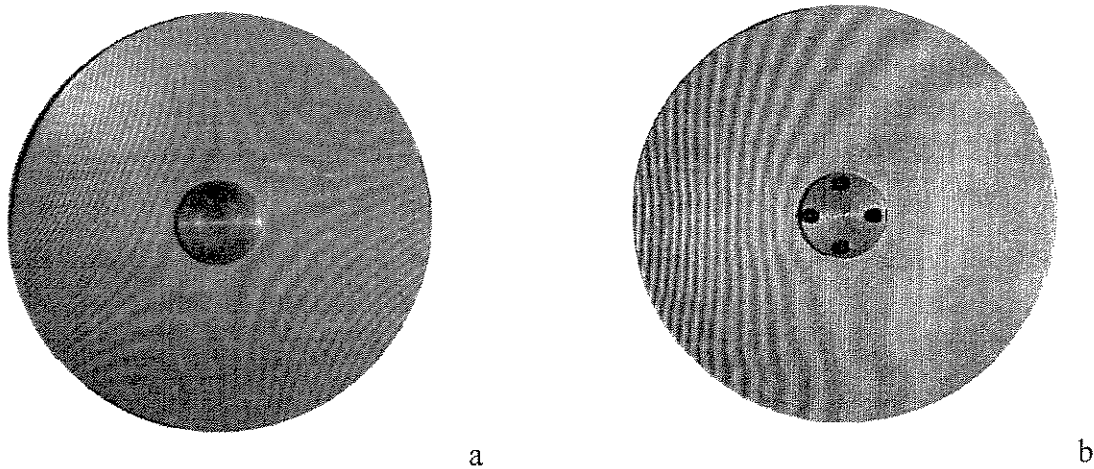


Figura 23. Padrões de franjas para “z” = 25mm. a) dinâmico b) estático

As imagens foram então transformadas de arquivos do tipo “BMP de 24 bits” para “BMP de 8 bits” com 256 tons de cinza e importadas para o programa RISING SUN *MOIRÉ*, ZYWANG (2001), onde as franjas foram detectadas e afinadas de forma a aumentar a precisão da informação da cota de cada ponto da superfície do disco como mostra a figura 24.

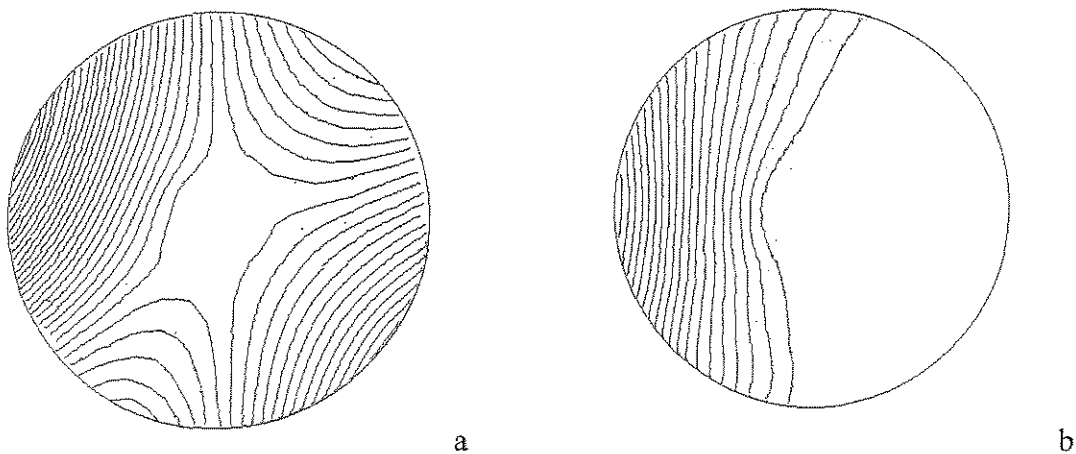


Figura 24. Franjas afinadas para “z” = 25mm a) dinâmico b) estático

Logo após a detecção das franjas, foram atribuídos números de ordem a cada uma das franjas para possibilitar o cálculo automático dos deslocamentos na superfície do disco pelo programa.

Após a detecção das franjas, foram atribuídos números de ordem a cada uma delas e efetuado o cálculo automático, pelo programa, dos deslocamentos na superfície do disco, possibilitando assim a geração dos mapas de cores mostrados na figura 25.

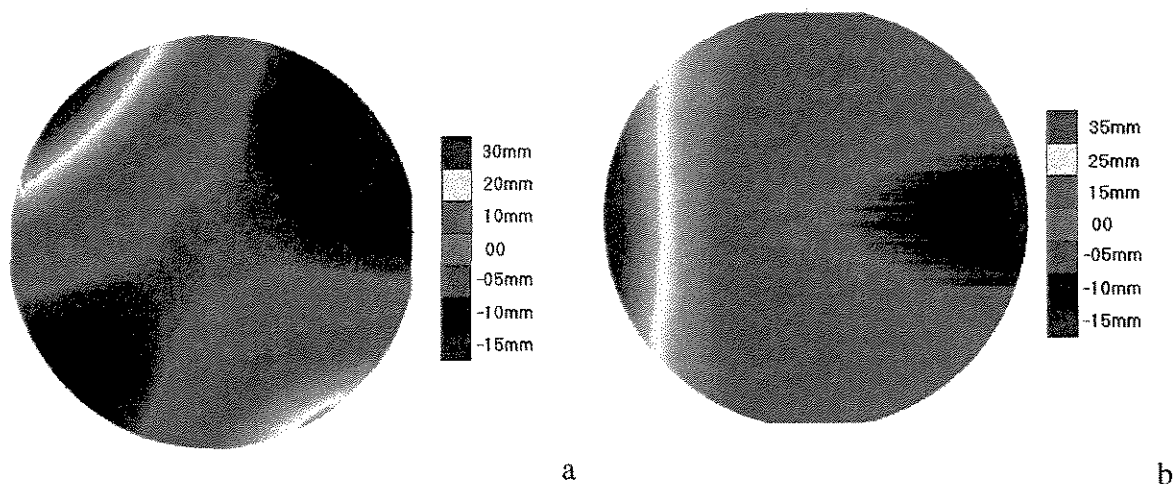


Figura 25. Mapa de cores para “z” = 25mm a) dinâmico b) estático

Ainda no ambiente do RISING SUN *MOIRÉ*, utilizando-se os valores da cota “z” calculados para cada ponto da superfície do disco, foram gerados automaticamente os modelos topográficos mostrados na figura 26.

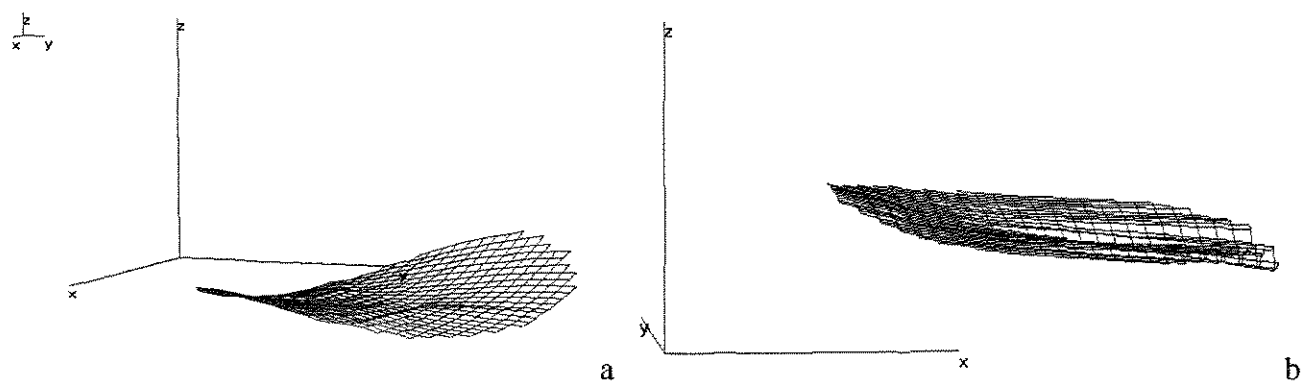


Figura 26. Modelo topográfico “z” = 25mm a) dinâmico b) estático

Para se determinar com a necessária precisão o perfil do bordo do disco de borracha, submetido à flexão nos regimes dinâmico e estático, foi criada uma máscara com linhas radiais distanciadas de 15 graus que quando sobreposta às imagens das franjas afinadas, facilita sua contagem e permite estabelecer o número de ordem das franjas no bordo do disco a cada 15 graus, como pode ser observado na figura 27.

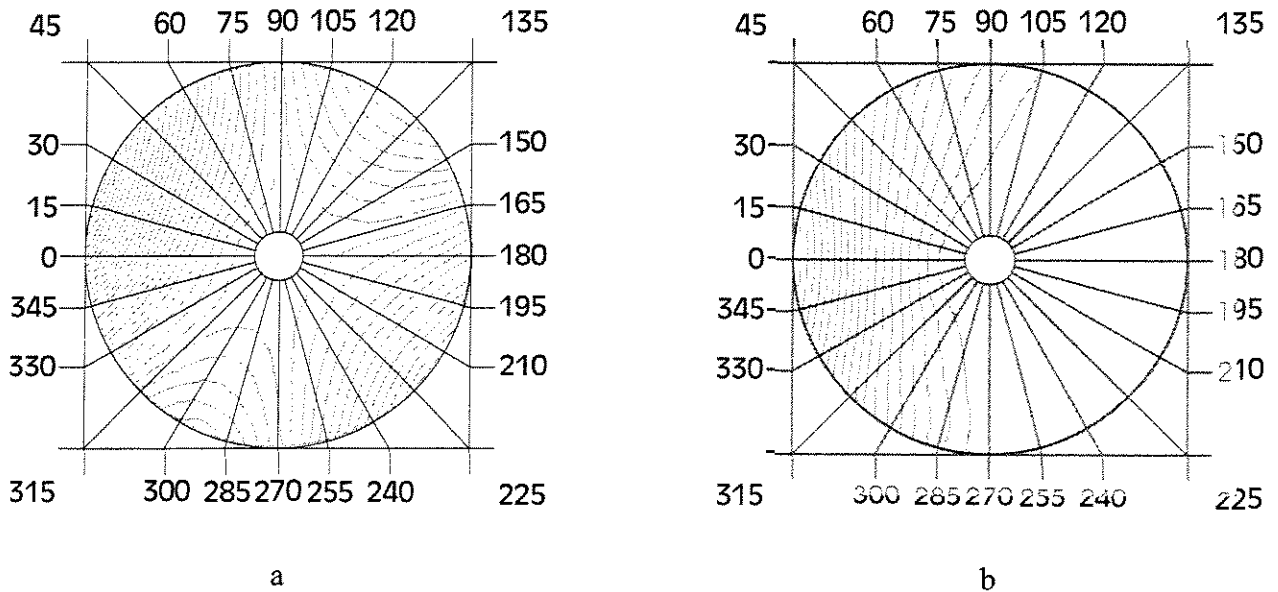


Figura 27. Máscara para contagem de franjas. a) dinâmico b) estático

No caso de ocorrência de números de ordem fracionários, as imagens eram importadas para o programa "COREL PHOTO PAINT" e as frações determinadas contando-se as quantidades de pixels existentes entre duas franjas utilizando-se os comandos de "zoom".

A diferença de cota entre 2 franjas adjacentes foi obtida através da Equação 19, proposta por MEADOWS, JONHSON & ALLEN (1970), WHITEHOUSE (1994) e POST, HAN & IFJU (1994), para arranjos experimentais utilizando iluminação feita com uma fonte de luz não coerente que considerando a distância entre a fonte de luz e o plano do disco de borracha $h = 1200$ mm, a distância entre a câmera e fonte de luz $d = 950$ mm e o período do retículo $p = 1.2$ mm, a diferença de cota entre duas franjas adjacentes foi calculada como sendo $z = 1.51$ mm.

Para se determinar a precisão da Técnica de *Moiré* de Sombra e a magnitude das deformações sofridas pelo disco de borracha, na realização dos ensaios estáticos, a altura do

bordo do disco em relação ao plano de referência foi medida em toda a circunferência também a intervalos de 15 graus, com paquímetro digital MITUTOYO, modelo DC20C com precisão de 0,01mm.

Os dados relativos à cota do bordo do disco obtidos através da Técnica de *Moiré* de Sombra e do paquímetro digital foram então importados para o ambiente MATLAB, onde foram transformados em vetores e analisados. Através do uso de rotinas de interpolação, foram criados gráficos do perfil do bordo do disco para comparação dos dados obtidos pela Técnica de *Moiré* de Sombra com os obtidos pela medição com paquímetro, em toda a circunferência do disco no regime estático, para cada nível de flexão.

Em seguida, da mesma maneira, os dados relativos à cota do bordo do disco obtidos através da Técnica de *Moiré* de Sombra para o ensaio dinâmico foram importados para o ambiente MATLAB, transformados em vetores e analisados. Através do uso de rotinas de interpolação, foram criados gráficos comparativos do perfil do bordo do disco em toda a sua circunferência, para cada nível de flexão imposto nos regimes estático e dinâmico.

4.2. Estudos de Acompanhamento do Perfil.

Para os estudos da capacidade de acompanhamento de um perfil que simulasse a ação do solo pelo disco flexível, foram utilizados parâmetros médios de algumas das variáveis do corte de cana-de-açúcar, como velocidade periférica e ângulo de inclinação do disco.

Para simular a ação da força de reação do solo foi providenciado um dispositivo especial composto por rolamentos dispostos em semicírculo e distanciados entre si de 15 graus, que será descrito mais adiante.

4.2.1. Arranjo experimental.

Para os estudos da capacidade de acompanhamento de um perfil que simulasse a ação do solo pelo disco flexível, foi providenciado um novo arranjo experimental no qual o disco foi acionado por um motor elétrico trifásico de 0,55kw, acoplado a um inversor de frequência

WEG CFW 09 VECTRUE INVERTER para possibilitar a variação da velocidade de acionamento do disco.

Da mesma forma que nos estudos preliminares, o conjunto motor disco foi afixado em uma superfície plana, de forma a coincidir seu centro com a origem de um sistema de coordenadas (x,y,z), previamente estabelecido. O plano de giro do disco também foi posicionado de forma a coincidir com o plano $z = 51,5$ mm.

Os retículos utilizados, foram os mesmos dos estudos preliminares confeccionados pela técnica de fotolito em bureau de impressão especializado com 450 x 450 mm, porém apenas com de período de 1.2 mm por ter sido o que apresentou os melhores resultados nos estudos realizados anteriormente.

Da mesma forma que nos estudos preliminares, para evitar a deformação no retículo, este foi colocado entre duas placas de vidro liso transparente de 3mm de espessura, fixados em um suporte que mantinha o conjunto a uma distância constante da superfície do disco.

Um disco de 300mm de diâmetro foi fabricado a partir de um lençol de borracha de 5.3 mm de espessura, utilizando-se para o corte do mesmo o processo de corte à água, garantindo a precisão dimensional. Para possibilitar a visualização das franjas em função do uso de luz branca, o disco de borracha foi recoberto com um filme vinílico branco fosco de forma a aumentar o contraste entre as franjas claras e escuras.

O dispositivo utilizado para simular a força de reação do perfil do solo é composto de um semicírculo metálico de 255 mm de diâmetro com 13 rolamentos de uma carreira de esferas SKF 6.201, com 30 mm de diâmetro externo e 10 mm de largura, dispostos tangencialmente à cada 15 graus. Os rolamentos recobrem um setor de 180 graus onde será analisada a capacidade de acompanhamento do perfil e tem por objetivo diminuir o atrito entre o disco e o perfil. A distância entre a linha de centro à secção longitudinal dos rolamentos e o centro de rotação do disco que coincidia com a origem do sistema de coordenadas, era de 130 mm. O centro do semicírculo metálico coincidia também com a origem do sistema de coordenadas e o dispositivo possui ainda um sistema de posicionamento composto juntas giratórias e barras roscadas que lhe permite uma rotação em torno do eixo “y” entre

aproximadamente -15 e 70 graus em relação ao plano “x y”, tomando-se o sentido horário como positivo.

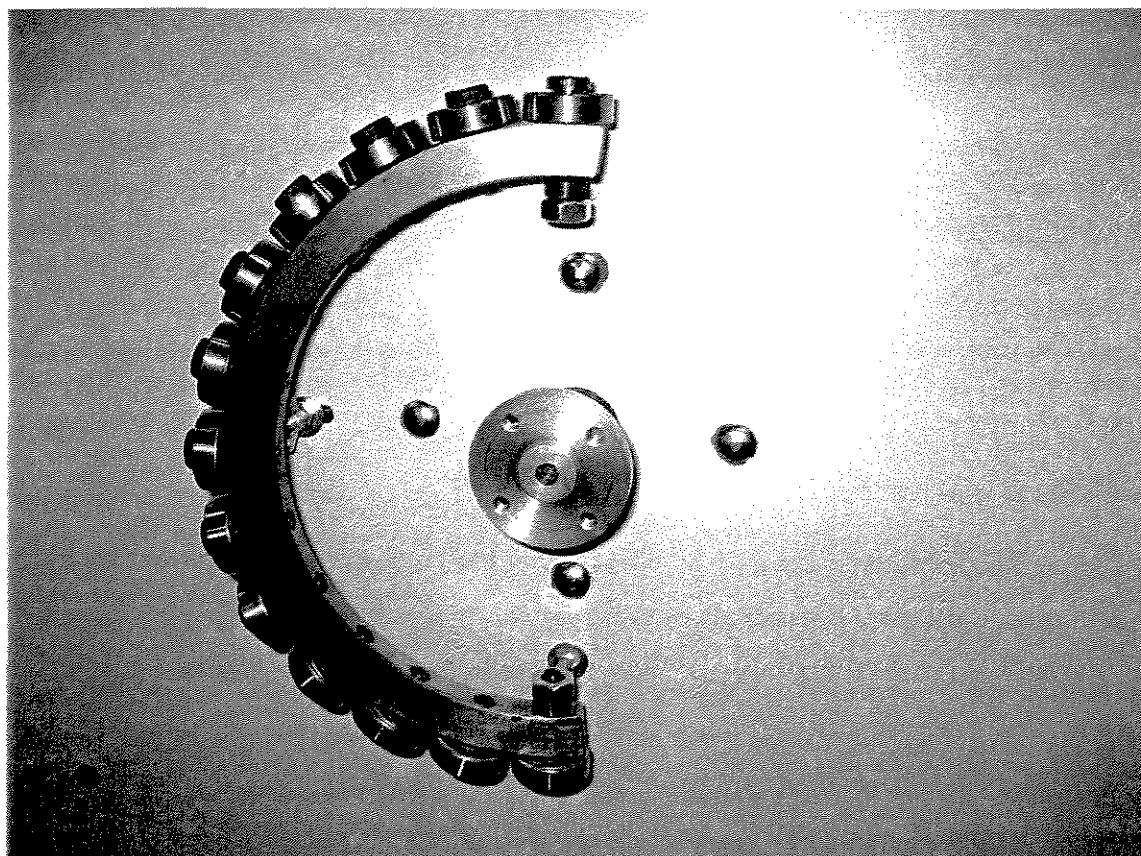


Figura 28: Dispositivo utilizado para simular o perfil do solo.

Considerando que os melhores resultados no corte inercial de cana-de-açúcar são obtidos quando a velocidade periférica do disco de corte é da ordem de 17 ms^{-1} , KROES & HARIS (1996), e que segundo GUPTA & ODUORI (1992) os menores consumos de energia no corte se dão com velocidades periféricas dos discos entre 13.8 e 18.4 ms^{-1} , que segundo BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002), o corte inercial dos colmos requer uma velocidade de 20 a 25 ms^{-1} e que outros autores indicam que velocidades elevadas, principalmente acima de 22 ms^{-1} podem ter uma influência positiva no corte inercial, o disco de borracha foi acionado no sentido horário com velocidades periféricas de 10 , 15 , 20 , 25 e 30 ms^{-1} , o que equivale às rotações $n= 637$, 955 , 1.273 , 1.591 e 1.910 rpm respectivamente.

Considerando que o ângulo de inclinação dos discos de corte basal mais comumente usado é da ordem de 10 graus, BRAUNBECK & MAGALHÃES (2002), mas que

no corte inercial de cana-de-açúcar foram obtidos por GUPTA & ODUORI (1992), quando os ângulos de inclinação do disco foram posicionados em 27 graus, o disco de borracha utilizado no presente trabalho foi acionado no sentido horário e o perfil que simula a reação do solo posicionado com ângulos de inclinação “ α ” de 5, 10, 15 e 20 graus. Apenas metade do disco, correspondente ao setor de 270 a 90 graus foi submetida à flexão. Exatamente nestas duas posições, os rolamentos tangenciaram o plano da superfície inferior do disco. Para todos os 4 posicionamentos do perfil, o disco, foi fotografado no regime estático e a diferença de cota do bordo no setor de 270 a 90 graus medida em intervalos de 15 graus com paquímetro digital da marca MITUTOYO modelo CD20C com 0,01mm de precisão. Os dados obtidos através da medição das cotas do bordo do disco com paquímetro assim como os dados obtidos numericamente através das relações trigonométricas entre os ângulos de inclinação do perfil e metade do comprimento das cordas paralelas ao eixo “x” traçadas em cada um dos pontos onde se tomaram as medidas, foram utilizados para se verificar o erro do sistema. As medidas das cordas e das diferenças de cota em relação ao plano de giro do disco obtidas numericamente, podem ser vistas no quadro 2.

Quadro 2. Medidas das cordas e das diferenças de cota obtidas numericamente.

Posição (°)	Corda/2	Diferença de Cota			
		5 graus	10 graus	15 graus	20 graus
270	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
285	38,82	3,38	6,74	10,05	13,28
300	75,00	6,54	13,02	19,41	25,65
315	106,06	9,24	18,42	27,45	36,27
330	129,90	11,32	22,56	33,62	44,43
345	144,88	12,63	25,16	37,50	49,55
0	150,00	13,07	26,05	38,82	51,30
15	144,88	12,63	25,16	37,50	49,55
30	129,90	11,32	22,56	33,62	44,43
45	106,06	9,24	18,42	27,45	36,27
60	75,00	6,54	13,02	19,41	25,65
75	38,82	3,38	6,74	10,05	13,28
90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Também como nos estudos preliminares, um projetor de slides SAWYERS, modelo GRAND PRIX 570R, com lâmpada de 500 watts, foi utilizado como fonte de luz branca sendo posicionado obliquamente ao plano do disco a uma distância $d=950\text{mm}$ da câmera fotográfica.

Para registrar as imagens do disco em movimento foi utilizada uma câmera digital da marca CANON, modelo POWER SHOT S45 com resolução de 1024×768 pixels, posicionada perpendicularmente ao plano de rotação do disco a uma distância $h = 1200\text{mm}$.

Um desenho esquemático do arranjo experimental pode ser observado na figura 29.

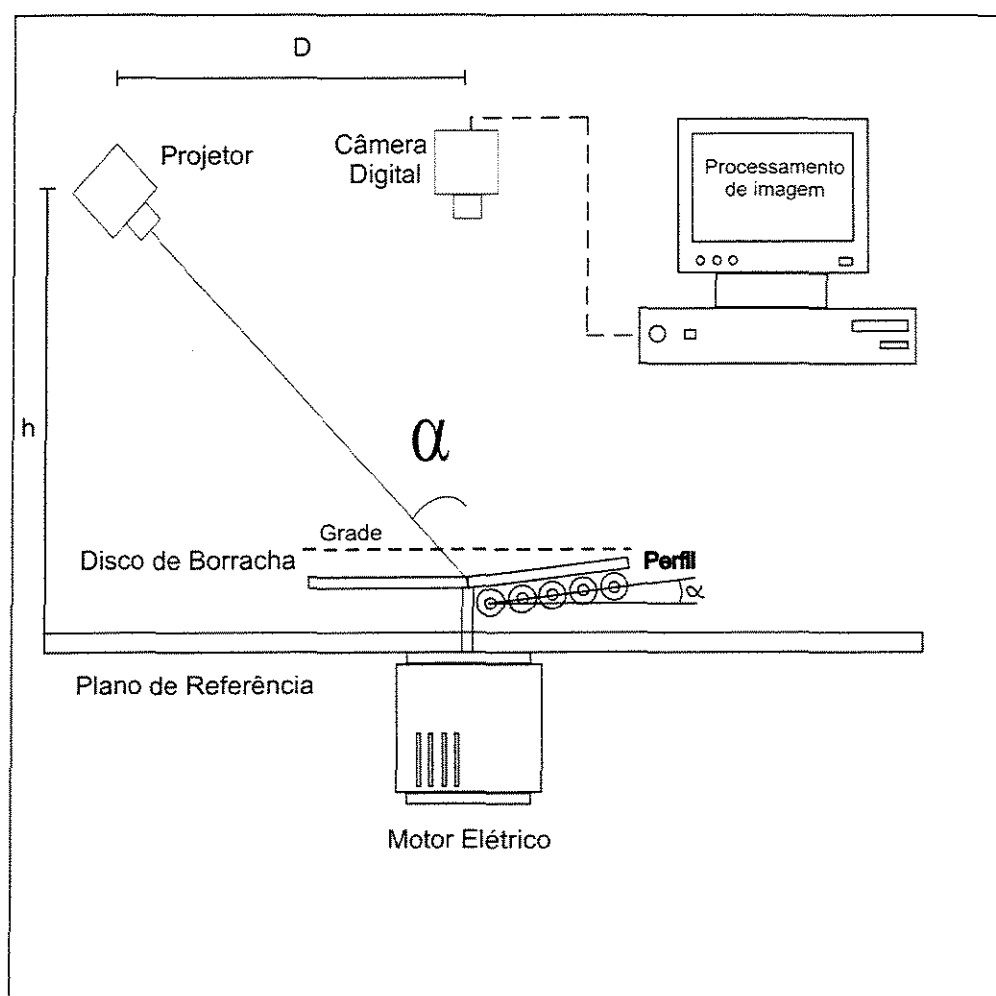


Figura 29. Diagrama do arranjo experimental para seguimento do perfil.

4.2.2. Obtenção e tratamento das imagens.

A fotografias dos padrões de franjas de cada nível de flexão imposta ao disco pelo perfil, foram tomadas em duas sessões, sendo a primeira em regime estático cujos resultados foram usados para comparação com as medidas tomadas pelo paquímetro e a segunda em regime dinâmico para determinar a capacidade de acompanhamento do perfil. Imediatamente após a tomada da imagem em regime estático se seguiam as tomadas em regime dinâmico para cada uma das rotações previamente estabelecidas. Ao final de uma sessão de fotos, a inclinação do, perfil era alterada e a nova sessão tinha início.

Após a obtenção, as imagens dos padrões de franjas de cada nível de deformação imposta ao disco pelo perfil, foram transferidas para um computador e tratadas conforme descrito a seguir. Como foi utilizado o mesmo tratamento para todas as imagens, para melhor compreensão e visualização, será utilizada sempre a imagem em regime estático com 10 graus de inclinação do perfil para demonstrar as várias etapas e resultados obtidos com cada passo do tratamento. A imagem original em regime estático com 10 graus de inclinação do perfil pode ser vista na figura 30.

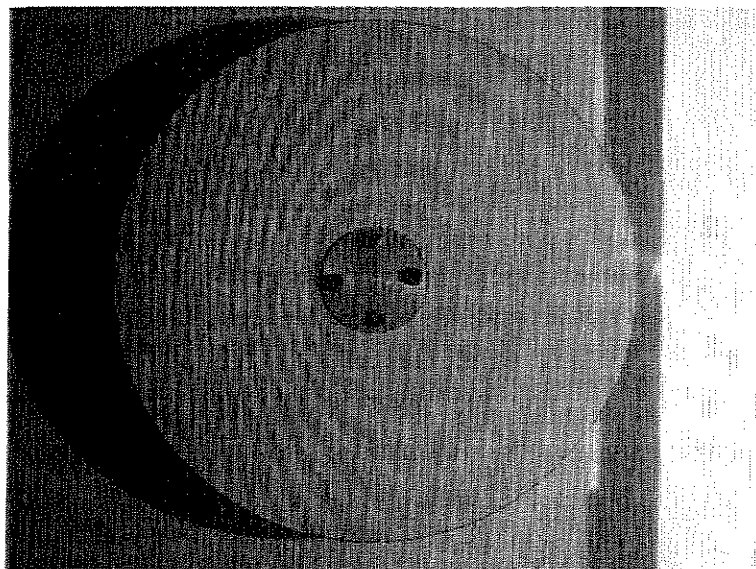


Figura 30. Imagem original regime estático e inclinação de 10 graus.

As imagens originais foram importadas para o programa de tratamento de imagens "COREL PHOTO PAINT" onde foram primeiramente delimitadas no perímetro do disco e com máscara circular. As imagens foram então redimensionadas para 640 x 480 pixels com resolução horizontal e vertical de 300 dpi, visando facilitar as operações seguintes em função do tamanho mostrado no monitor. Nessa mesma etapa foi também alterado o modo de cor das imagens de RGB de 24 bits para tons de cinza de 8 bits e salvas no formato bitmap para permitir que as mesmas fossem importadas nas etapas seguintes para o ambiente do software RISING SUN *MOIRÉ*, ZYWANG (2001), para complementar o tratamento. O resultados das operações descritas acima podem ser vistos na figura 31.

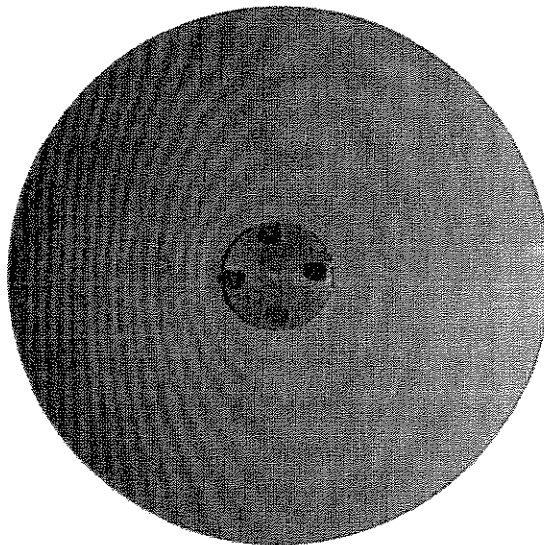


Figura 31. Imagem cortada e redimensionada.

As imagens em seguida, filtradas com filtros de passa baixa e de suavização a fim de remover as linhas de grade. Foram ainda removidos os efeitos de *Moiré* causados pela interação da lente da câmera com os retículos posicionados à frente do disco. Por fim para diminuir o efeito do reflexo da luz na superfície do disco, que produz regiões mais claras, dificultando o reconhecimento automático das franjas de *Moiré* e também para aumentar o contraste entre as franjas claras e escuras, as imagens foram equalizadas e o resultado dessas operações pode ser visto na figura 32.

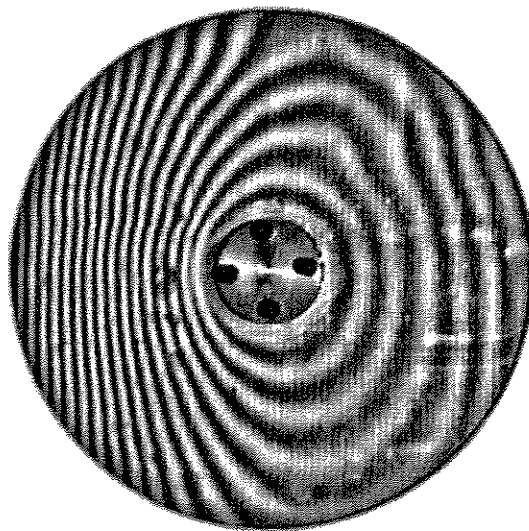


Figura 32. Imagem filtrada e equalizada.

As imagens foram então importadas para o programa *RISING SUN MOIRÉ*, ZYWANG (2001), onde as franjas foram automaticamente detectadas como mostrado na figura 33.

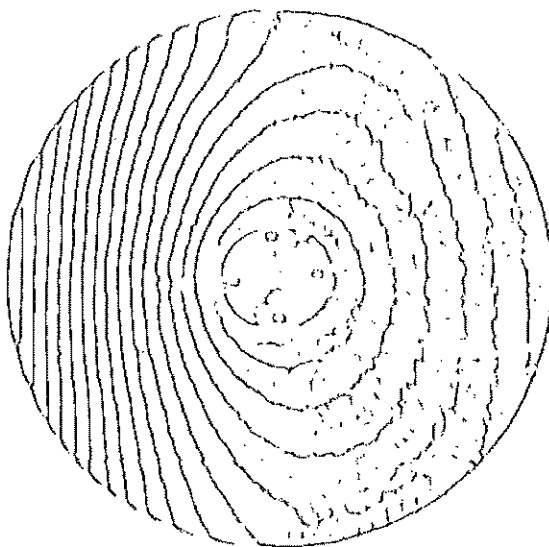


Figura 33. Imagem após detecção automática de franjas.

A seguir foram removidos os ruídos e as imagens importadas para o programa COREL DRAW, onde as franjas reparadas de forma a formarem uma linha contínua. A operação de reparo das franjas foi feita utilizando-se a imagem equalizada como pano de fundo para que não fossem distorcidas as informações do posicionamento das franjas. O reparo das franjas é mostrado na figura 34.

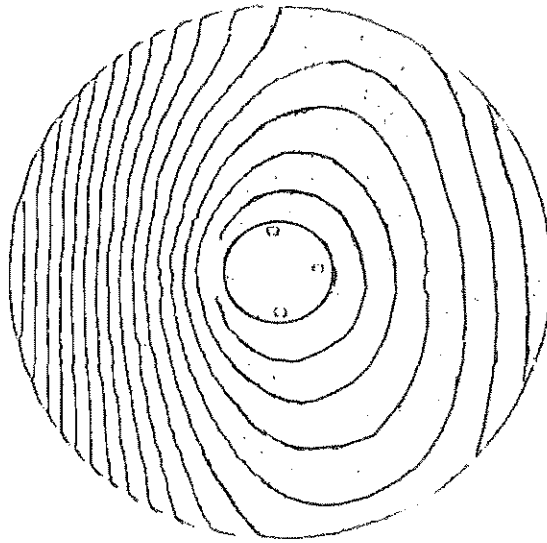


Figura 34. Imagem após reparo das franjas e remoção de ruídos.

Finalmente, as imagens foram novamente importadas para o programa RISING SUN *MOIRÉ*, ZYWANG (2001), onde as franjas foram automaticamente afinadas para aumentar a precisão da informação da cota de cada ponto da superfície e do bordo do disco como mostra a figura 35.

Da mesma maneira que nos estudos preliminares, para se determinar com a necessária precisão o perfil do bordo do disco de borracha, submetido à flexão nos regimes dinâmico e estático, foi criada uma máscara com linhas radiais, distanciadas entre si de 15 graus, que quando sobreposta às imagens dos padrões de franjas afinadas, facilita sua contagem e permite estabelecer o número de ordem das franjas no bordo do disco a cada 15 graus, como pode ser observado na figura 36.

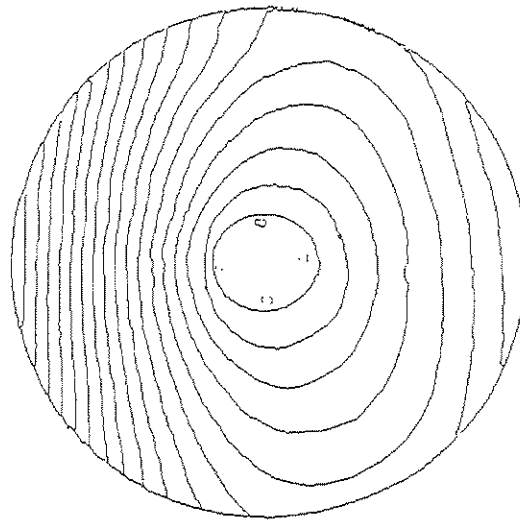


Figura 35. Imagem com padrões de franjas afinadas .

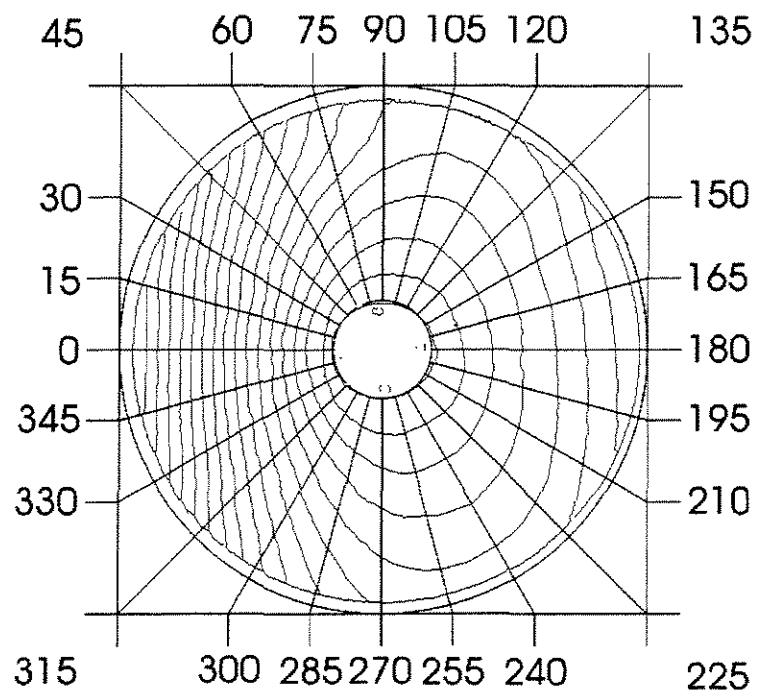


Figura 36. Máscara de linhas radiais sobreposta aos padrões de franjas afinadas .

Nos pontos onde ocorriam números de ordem fracionários, as imagens eram importadas para o programa "COREL PHOTO PAINT" e as frações determinadas contando-se as quantidades de pixels existentes entre duas franjas utilizando-se os comandos de "zoom" com arredondamento para cada $\frac{1}{4}$ de ordem de franja.

A diferença de cota entre 2 franjas adjacentes foi obtida através da Equação 19 proposta por MEADOWS JONHSON & ALLEN (1970), WHITEHOUSE (1994), e POST, HAN & IFJU (1994), para arranjos experimentais utilizando iluminação feita com uma fonte de luz não coerente, que considerando a distância entre a fonte de luz e o plano do disco de borracha $h = 1200$ mm, a distância entre a câmera e fonte de luz $d = 950$ mm e o período do retículo $p = 1.2$ mm, a diferença de cota entre duas franjas adjacentes foi calculada como sendo $z = 1.51$ mm.

Para se determinar a precisão da Técnica de *Moiré* de Sombra na realização dos ensaios estáticos, a altura do bordo do disco em relação ao plano de referência e conseqüentemente em relação ao plano de giro do disco, foi medida no setor compreendido entre 270 e 90 graus, também a intervalos de 15 graus, com paquímetro digital marca MITUTOYO modelo CD20C, com precisão de 0,01mm.

Os dados relativos à cota do bordo do disco obtidos através da Técnica de *Moiré* de Sombra e do paquímetro digital, assim como os dados obtidos numericamente através das relações trigonométricas entre os ângulos de inclinação do perfil e metade do comprimento das cordas paralelas ao eixo "x" foram então importados para o ambiente MATLAB, onde foram transformados em vetores e analisados. Através do uso de rotinas de interpolação, foram criados gráficos do perfil do bordo do disco no setor compreendido entre 270 e 90 graus, para comparação dos dados obtidos pela Técnica de *Moiré* de Sombra com os obtidos pela medição com paquímetro e os dados numéricos no regime estático, para cada ângulo " α " de inclinação do perfil.

Em seguida, da mesma maneira, os dados relativos à cota do bordo do disco, obtidos através da Técnica de *Moiré* de Sombra para o ensaio dinâmico, foram importados para o ambiente MATLAB, transformados em vetores e analisados. Através do uso de rotinas de interpolação, foram criados gráficos comparativos do perfil do bordo do disco no setor

compreendido entre 270 e 90 graus, para cada ângulo “ α ” de inclinação do perfil e para cada velocidade periférica do disco.

4.2.3. Comparação dos perfis.

As cotas de cada ponto do perfil do bordo do disco medidas com paquímetro e as obtidas através da Técnica de *Moiré* de Sombra, assim como as obtidas numericamente, foram transportados para uma planilha eletrônica, onde foram comparadas e feitas análises estatísticas (Média, Máximo, Mínimo, Amplitude e Desvio Padrão) das diferenças para o regime estático, como também foram calculadas a Correlação e Regressão entre os valores de “z” para cada ângulo de inclinação do perfil e o Desvio Padrão das diferenças entre o método de *Moiré* e os valores obtidos numericamente para cada ângulo “ α ” de inclinação do perfil e para cada velocidade periférica do disco no regime dinâmico.

Para cada ângulo “ α ” de inclinação do perfil como para cada velocidade periférica do disco, foram criados gráficos para verificação da capacidade de seguimento do perfil pelo disco flexível, sendo tais dados comparados com os obtidos numericamente através das relações trigonométricas entre os ângulos de inclinação do perfil e metade do comprimento das cordas paralelas ao eixo “x” traçadas em cada um dos pontos de medida das diferenças de cota entre o plano de giro e o bordo do disco.

5. RESULTADOS PRELIMINARES

Com relação aos retículos, os melhores resultados foram obtidos com o de período de 1.2 mm, pois com os retículos de 0.4 e 0.8 mm as franjas de *Moiré* geradas eram pouco visíveis devido à difração da luz branca e também à grande distância entre o retículo de referência e o plano do disco. No caso do retículo de 2.0 mm de período, apesar de visíveis, as franjas foram geradas em pequeno número o que prejudica a precisão das medidas.

O quadro 3 apresenta os resultados obtidos para a medição das cotas do bordo do disco utilizando-se o paquímetro e a técnica de *Moiré* de sombra. Para ambos os casos, a segunda casa decimal do resultado obtido foi desprezada.

Quadro 3. Cotas do bordo do disco para os 5 níveis de flexão.

Setor (o)	Flexão 5mm			Flexão 10mm			Flexão 15mm			Flexão 20mm			Flexão 25mm		
	Est.	Paq.	Dif.	Est.	Paq.	Dif.	Est.	Paq.	Dif.	Est.	Paq.	Dif.	Est.	Paq.	Dif.
0	6,8	6,2	0,6	13,0	12,2	0,8	18,6	17,4	1,2	24,8	23,5	1,3	31,8	29,4	2,4
15	6,6	5,8	0,8	12,4	11,7	0,7	16,3	16,6	-0,3	18,6	19,7	-1,1	28,7	26,1	2,6
30	6,6	5,8	0,8	11,3	11,5	-0,2	14,0	14,3	-0,3	14,4	15,1	-0,7	23,3	24,6	-1,3
45	6,3	5,5	0,8	9,6	10,0	-0,4	11,6	11,5	0,1	10,4	11,4	-1,0	17,1	18,7	-1,6
60	6,2	5,3	0,9	8,2	8,6	-0,4	9,3	9,0	0,3	7,3	8,6	-1,3	11,6	11,4	0,2
75	6,0	5,2	0,8	7,1	7,3	-0,2	7,8	8,2	-0,4	4,7	5,6	-0,9	7,8	8,2	-0,4
90	5,0	5,1	-0,1	5,7	5,3	0,4	5,0	5,5	-0,5	2,3	2,4	-0,1	4,2	5,1	-0,9
105	4,5	4,4	0,1	4,2	4,4	-0,2	3,6	3,8	-0,2	0	1,2	-1,2	0	2,3	-2,3
120	3,8	4,0	-0,2	3,1	2,9	0,2	2,0	2,6	-0,6	0	0,2	-0,2	0	0,6	-0,6
135	3,0	3,1	-0,1	2,3	2,0	0,3	0	1,2	-1,2	0	-0,1	0,1	0	-0,3	0,3
150	0,0	0,9	-0,9	0,0	1,1	-1,1	0	0,0	0	0	-0,6	0,6	0	-0,5	0,5
165	0,0	0,3	-0,3	0,0	0,0	0,0	0	-0,3	0,3	0	-0,6	0,6	0	-0,5	0,5
180	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,2	0	-0,6	0,6	0	-0,2	0,2	0	-0,6	0,6
195	0,0	-0,2	0,2	0,0	-0,3	0,3	0	-0,5	0,5	0	0	0	0	-0,3	0,3
210	0,0	-0,4	0,4	0,0	-0,1	0,1	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0
225	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0	0	0,2	-0,2	0	0,2	-0,2
240	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,5	-0,5	0	0,6	-0,6	0	0,6	-0,6	0	0,3	-0,3
255	1,5	1,4	0,1	1,9	1,5	0,4	0	1,1	-1,1	0	1,0	-1,0	0	1,0	-1,0
270	2,7	3,0	-0,3	2,5	2,7	-0,2	2,3	2,6	-0,3	1,6	2,2	-0,6	0	1,8	-1,8
285	3,5	3,7	-0,2	3,7	3,5	0,2	4,7	4,3	0,4	4,2	4,0	0,2	3,9	3,5	0,4
300	3,8	3,7	0,1	5,4	5,8	-0,4	7,8	7,1	0,7	8,5	8,7	-0,2	9,3	7,6	1,7
315	4,5	4,4	0,1	7,8	7,6	0,2	10,9	10,2	0,7	13,2	12,6	0,6	15,5	14	1,5
330	6,2	5,2	1,0	10,1	9,8	0,3	14,0	12,9	1,1	18,6	17,1	1,5	22,5	20,5	2,0
345	6,5	5,7	0,8	12,4	10,6	1,8	17,5	16,0	1,5	23,3	22,3	1,0	28,7	24,7	4,0
360	6,8	6,1	0,7	13,0	11,7	1,3	18,6	17,5	1,1	24,8	23,8	1,0	31,8	28,8	3,0

O quadro 4 apresenta os índices máximo, médio, desvio padrão e correlação de Pearson para as diferenças das medições das cotas de cada ponto do bordo do disco efetuadas com paquímetro e a técnica de *Moiré* de sombra.

Quadro 4. Estatísticas das cotas do bordo do disco medidas com paquímetro e *Moiré* de Sombra.

Índice	Flexão 5mm	Flexão 10mm	Flexão 15mm	Flexão 20mm	Flexão 25mm
Máximo	1,0	1,8	1,5	1,5	4,0
Média	0,2	0,1	0,1	-0,1	0,4
Desvio Padrão	0,489898	0,591664	0,700595	0,802081	1,573923
Pearson	0,989697	0,993587	0,996044	0,9964	0,994002

Os dados relativos ao comportamento do perfil do bordo do disco nos regimes estático e dinâmico para os 5 níveis de flexão impostos, são comparados nos gráficos das figuras 37 a 48 a seguir.

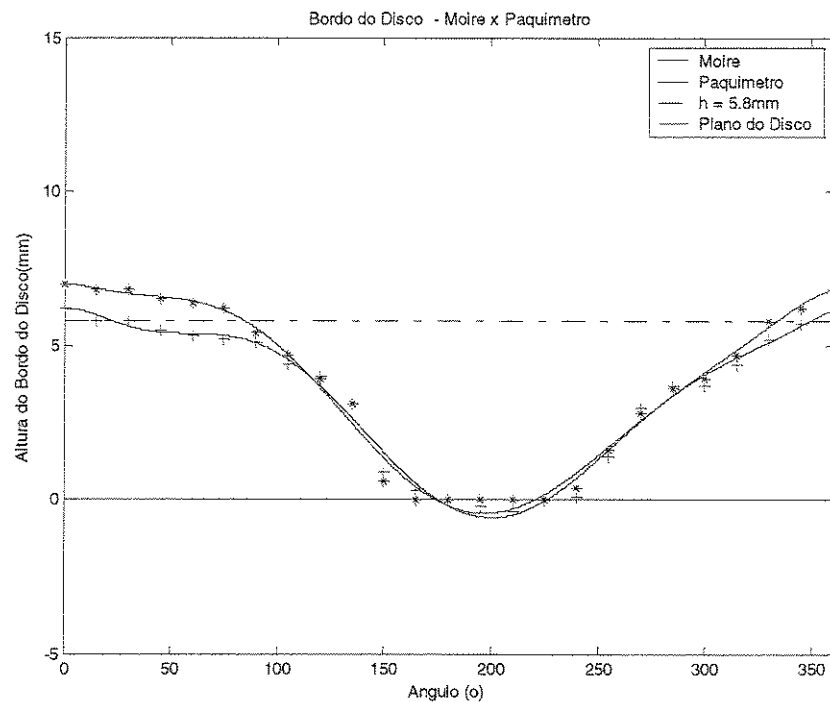


Figura 37. Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 5\text{mm}$

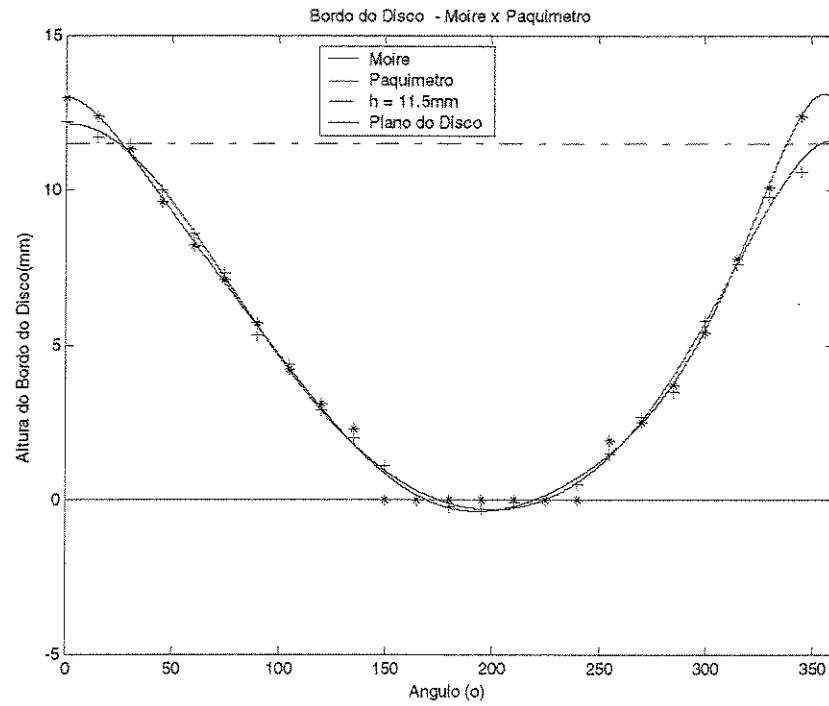


Figura 38. Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 10\text{mm}$

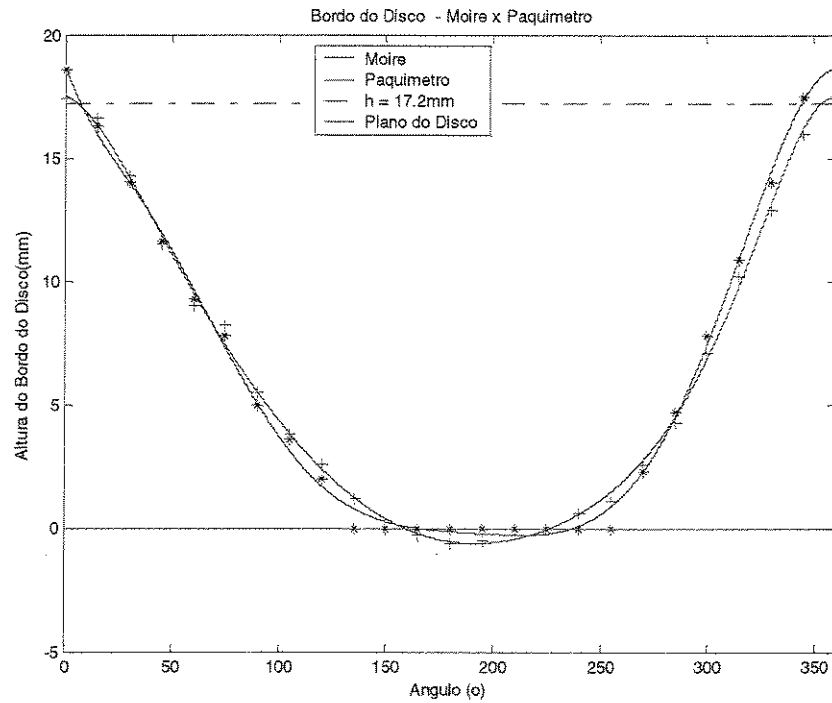


Figura 39. Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 15\text{mm}$

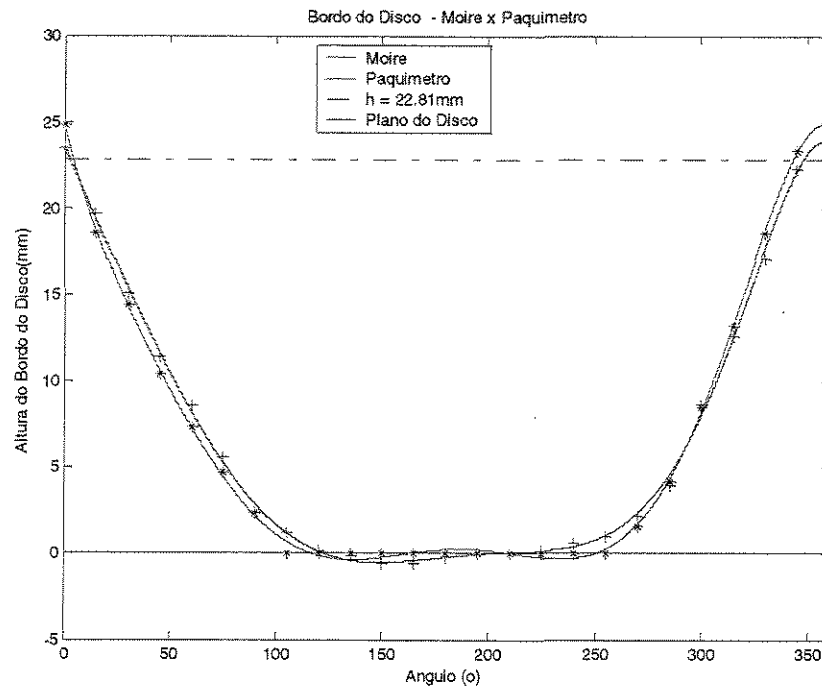


Figura 40. Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 20\text{mm}$.

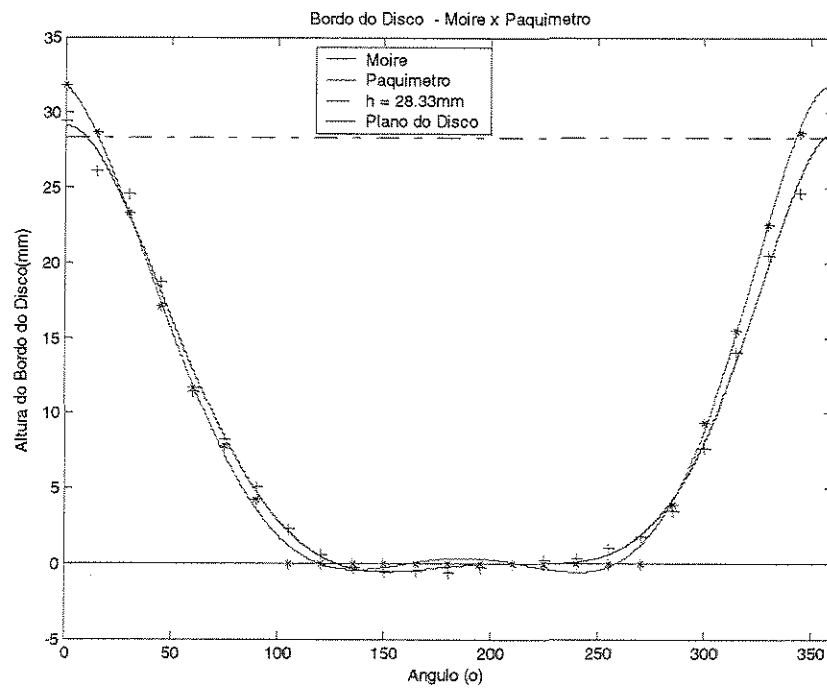


Figura 41. Regime estático: perfis do bordo do disco para $z = 25\text{mm}$.

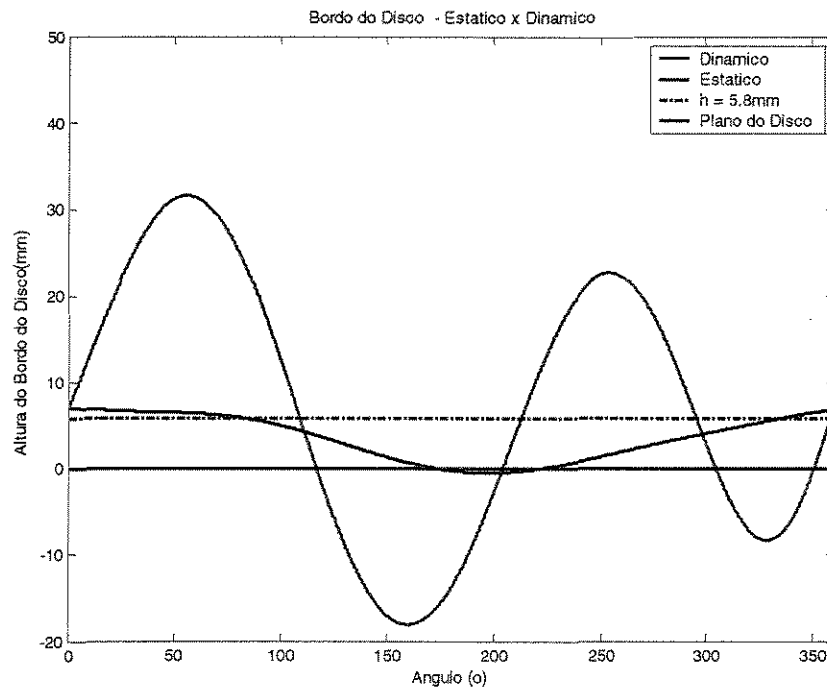


Figura 42. Comparação Estático Dinâmico: perfis do bordo do disco para $z = 5\text{mm}$.

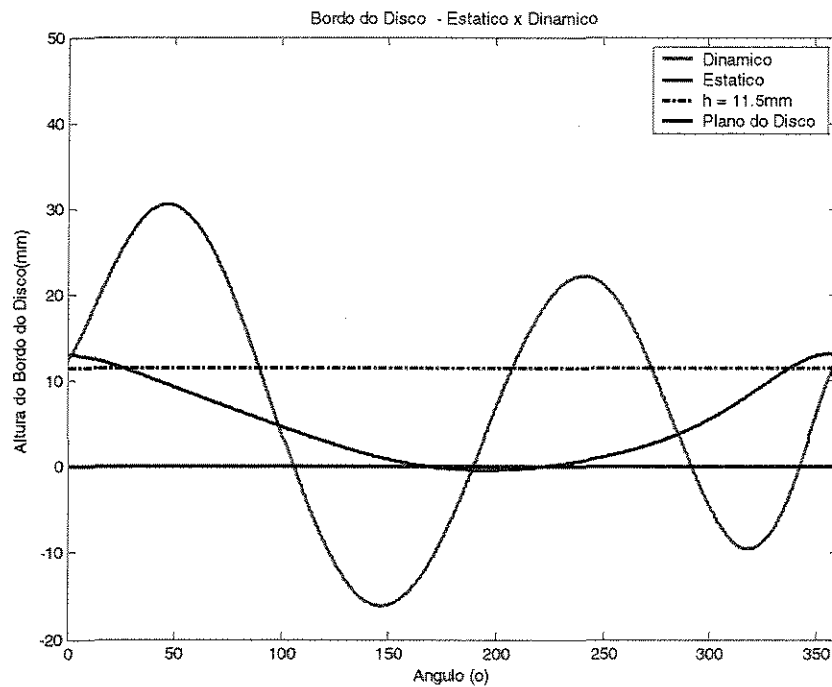


Figura 43. Comparação Estático Dinâmico: perfis do bordo do disco para $z = 10\text{mm}$.

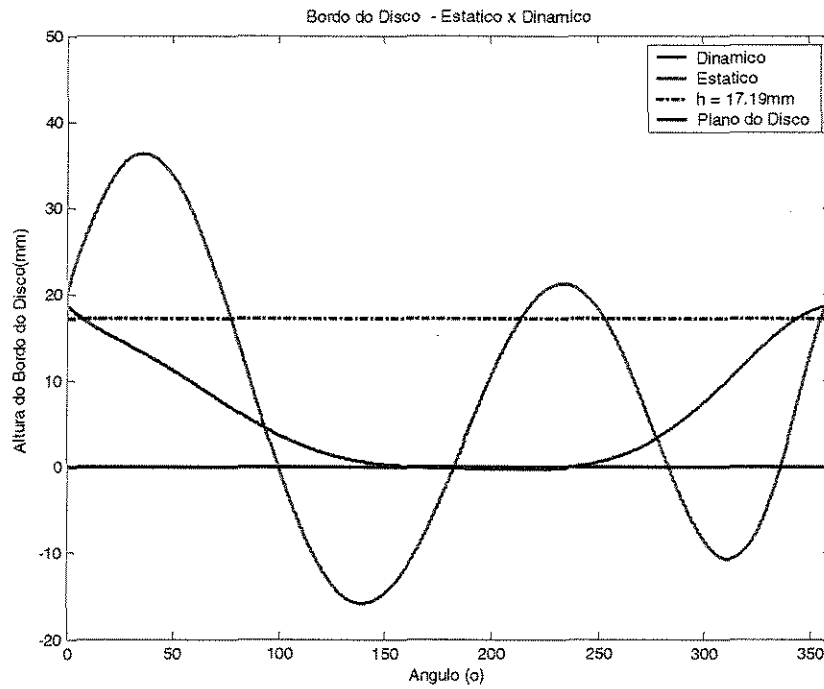


Figura 44. Comparação Estático Dinâmico: perfis do bordo do disco para $z = 15\text{mm}$.

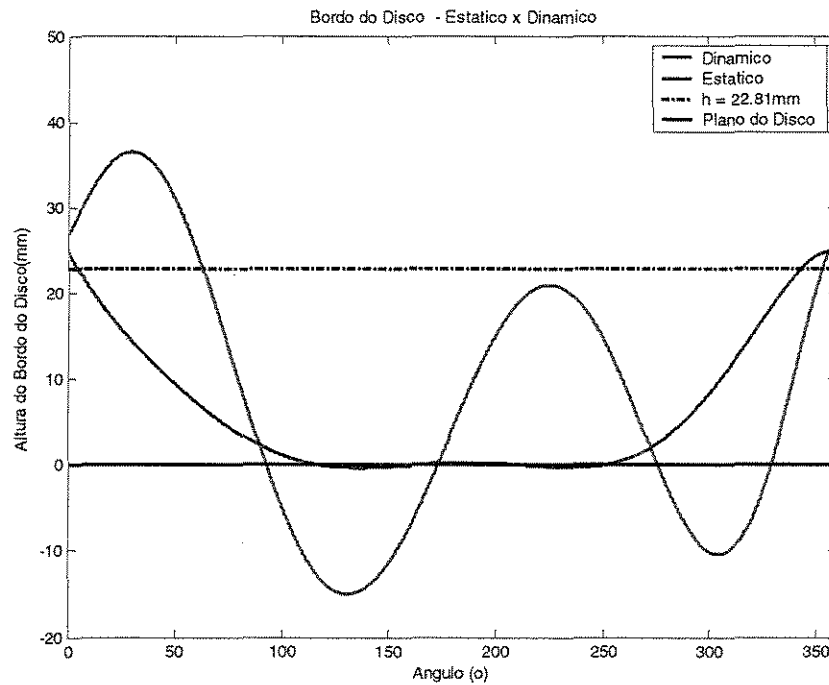


Figura 45. Comparação Estático Dinâmico: perfis do bordo do disco para $z = 20\text{mm}$

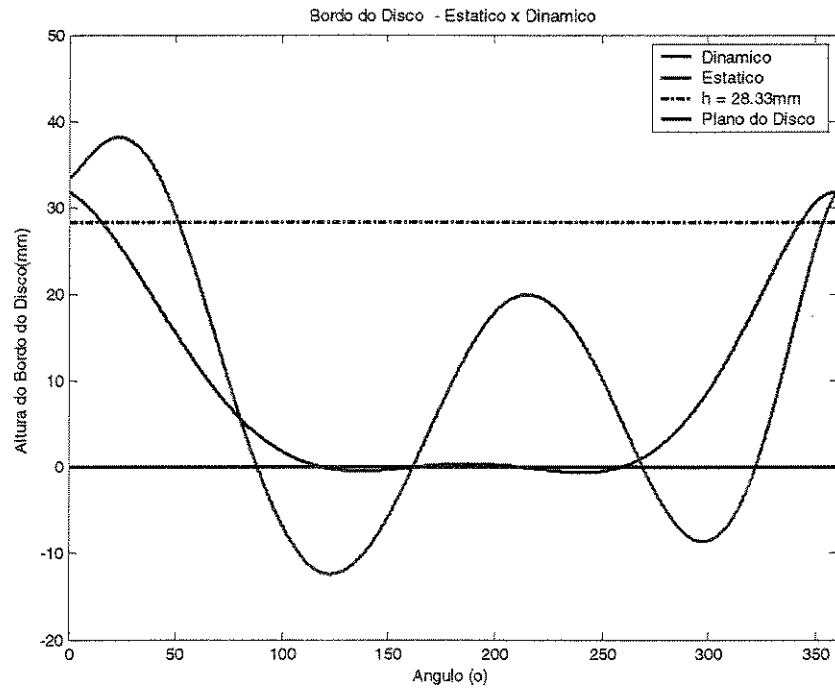


Figura 46. Comparação Estático Dinâmico: perfis do bordo do disco para $z = 25\text{mm}$.

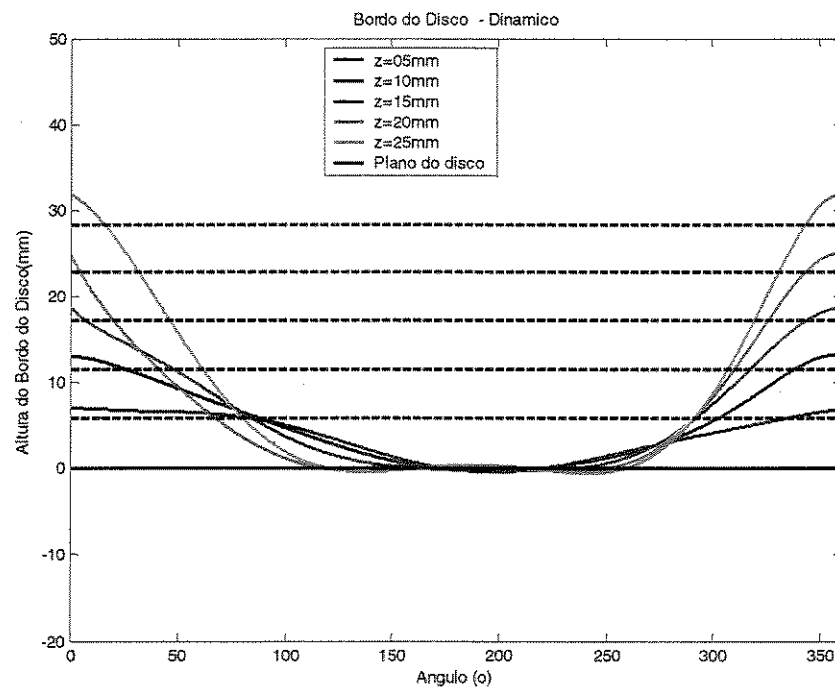


Figura 47. Comparação dos perfis do bordo do disco - Estático.

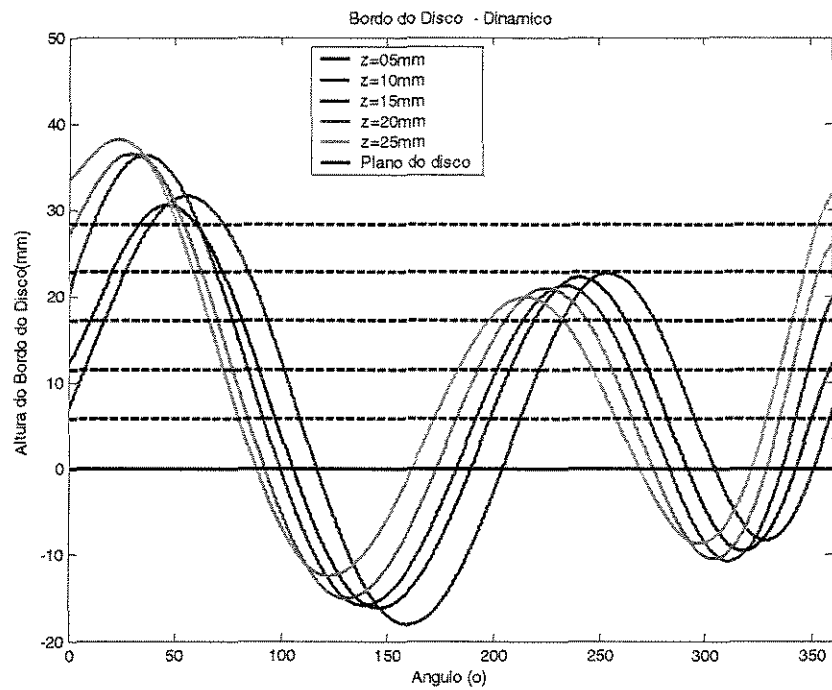


Figura 48. Comparação dos perfis do bordo do disco - Dinâmico.

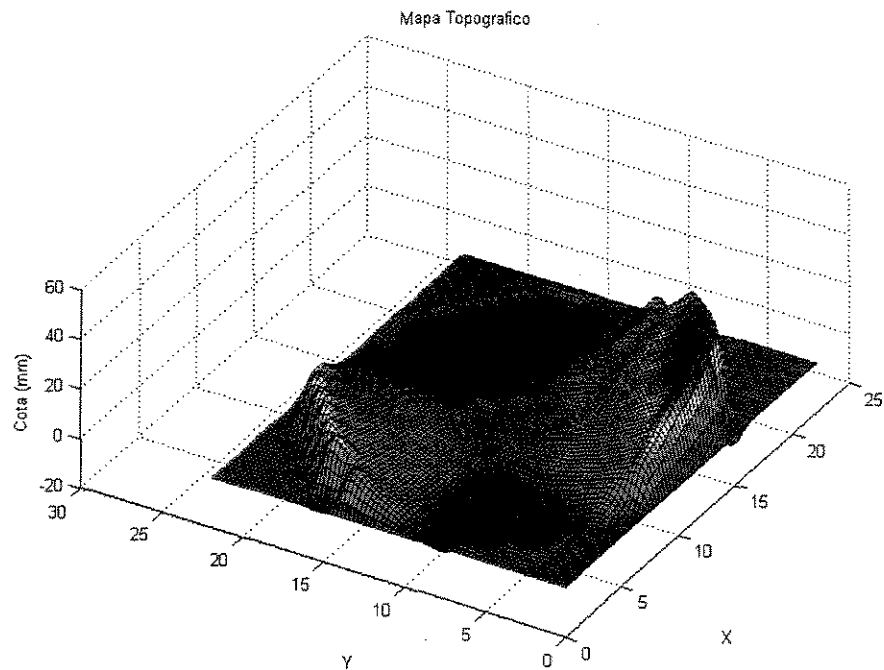


Figura 49. Mapa topográfico regime dinâmico para $z = 25\text{mm}$.

Foram também criados no ambiente MATLAB, gráficos para comparar as diferenças entre as deformações sofridas pelo disco em relação ao seu plano de rotação em função dos cinco níveis de flexão impostos. Esta comparação é apresentada pela figura 47 para o regime estático e pela figura 48 para o regime dinâmico.

Observando-se ainda a figura 47, para o regime estático, percebe-se que as alterações sofridas pelo bordo do disco são bastante uniformes, correspondendo somente aos 5 níveis de flexão aplicados pela roldana e que existe um pequeno erro no valor das cotas próximo ao ponto de aplicação que coincide com os ângulos 0 e 360 graus do gráfico.

Para o regime dinâmico, o comportamento do disco foi surpreendente, pois um ponto no bordo durante uma volta completa do disco descreve uma trajetória que lembra uma senóide com amortecimento. O ponto de cota mais elevada no bordo do disco não se deu a zero grau mas sim entre 30 e 60 graus, dependendo do nível de flexão imposta. O ponto de cota mais elevada também apresentou uma tendência de aproximação do ponto de aplicação da flexão à medida que esta foi incrementada.

Ainda no ambiente MATLAB, utilizando-se as informações dos padrões de franjas afinadas, foram criados modelos topográficos do disco para o regime dinâmico que permitem saber as informações relativas à cota de qualquer dos pontos de sua superfície. O mapa topográfico da superfície do disco para flexão de 25mm é mostrado na figura 49, onde pode-se observar que o disco, no regime dinâmico, assumiu um comportamento típico do formato de uma “sela”.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Acurácia da Técnica de *Moiré* de Sombra.

As imagens dos padrões de franjas para cada velocidade e inclinação do perfil foram registradas e são mostradas nas figuras 50 a 53. Da metodologia para tratamento das imagens descrita no capítulo anterior, resultaram 24 imagens dos padrões de franjas afinadas, sendo seis imagens para cada ângulo de inclinação do perfil, uma estática para comparação com a medição das cotas do bordo do disco tomadas com paquímetro e outras cinco, uma para cada velocidade periférica do disco. Durante a realização do experimento, na tentativa de se obter melhor nitidez dos padrões de franjas, pode ser observado que a seleção de menores valores de resolução da máquina fotográfica produziam melhores resultados por captarem uma menor quantidade de detalhes do arranjo experimental, como por exemplo brilhos, reflexos, sujidades e mesmo marcas de impressões digitais na superfície do vidro que recobria o retículo. Foram testadas as resoluções de 2272 x 1704 e 1024 x 768 pixels, sendo os melhores resultados, ou seja, maior nitidez dos padrões de franjas, apresentados pela segunda. Essas imagens são mostradas nas figuras 54 a 57, onde com o auxílio da máscara de linhas radiais, foram contadas as ordens das franjas para toda a circunferência do disco como descrito na metodologia para o regime estático e para cada uma das velocidades de acionamento. Os números de ordem e as respectivas cotas para cada um dos pontos analisados no bordo do disco são apresentados nos quadros 5 a 8. Para determinar o erro da técnica de *Moiré* de sombra para o arranjo experimental utilizado, os valores obtidos através dessa foram comparados com os valores numéricos determinados para o perfil do bordo do disco e também com os valores obtidos com a medição com paquímetro. Tais comparações foram feitas calculando-se a média, máximo, mínimo, amplitude e desvio padrão das diferenças entre os valores numéricos, os obtidos com a técnica de *Moiré* para regime estático e os valores obtidos com paquímetro conforme mostrado nos quadros 9 a 12.

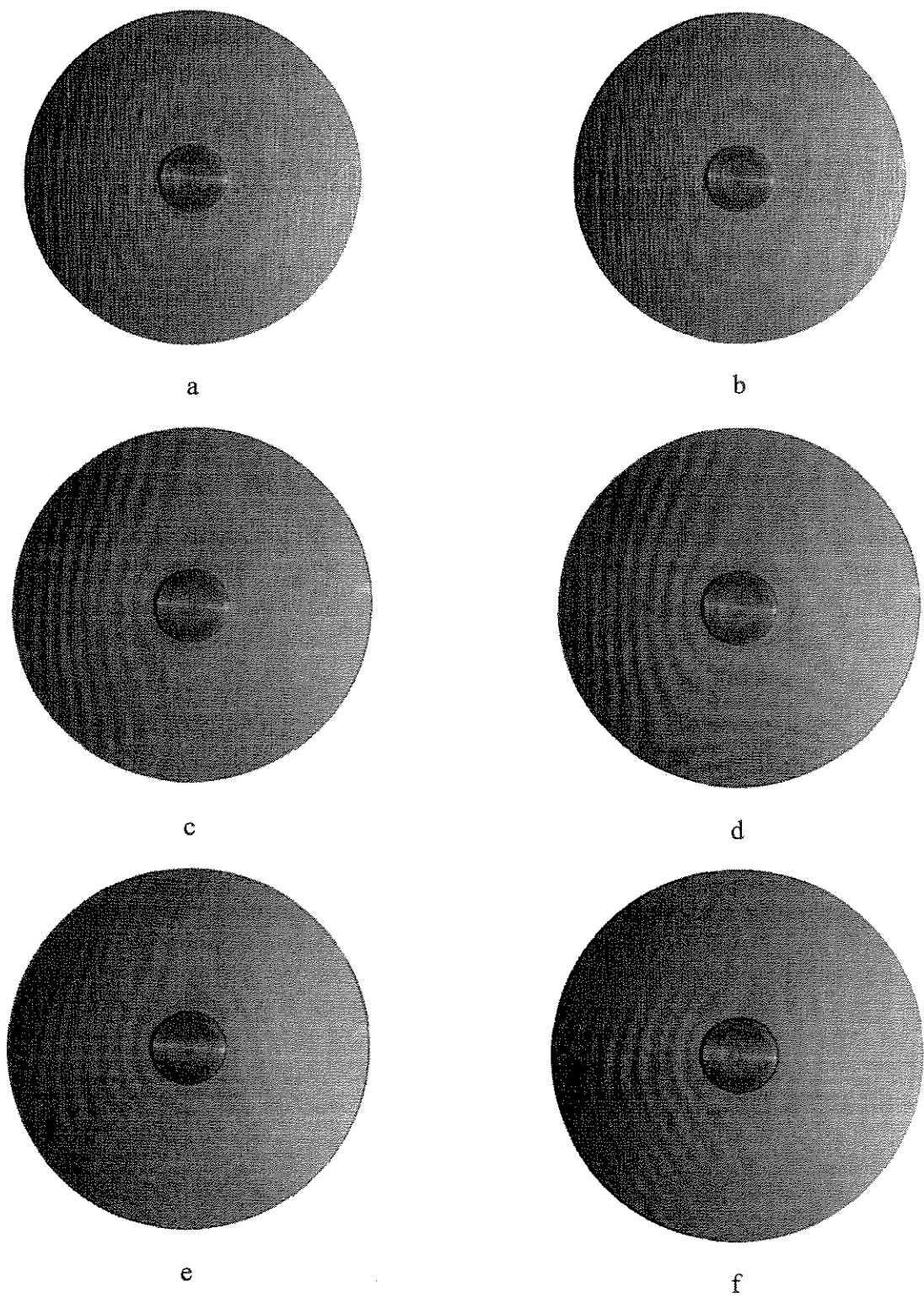
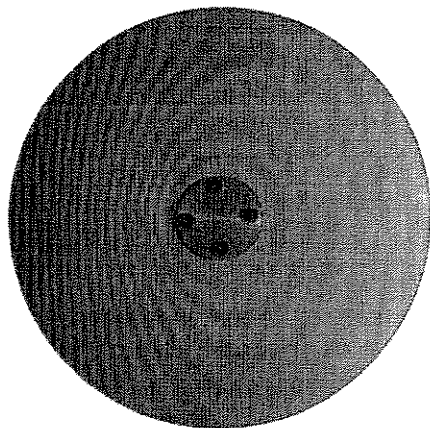
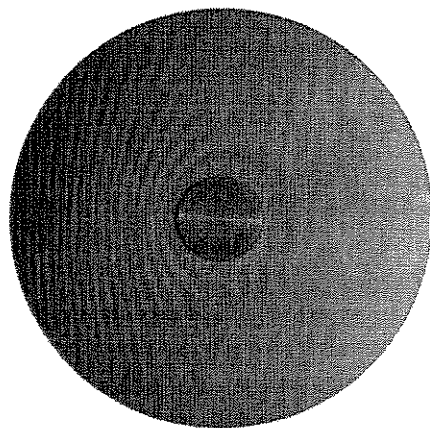


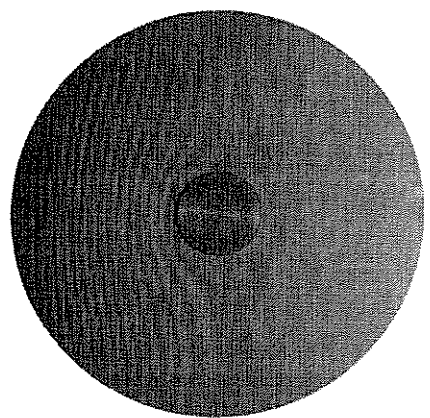
Figura 50. Padrões de franjas para $\alpha = 5$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, f) 1910 rpm.



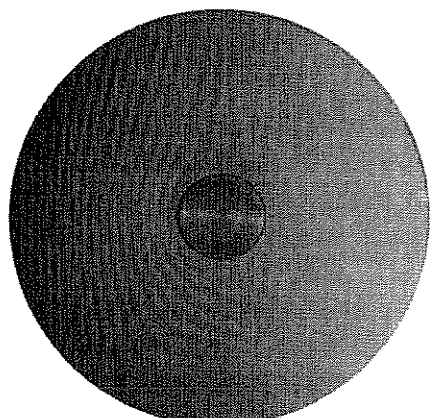
a



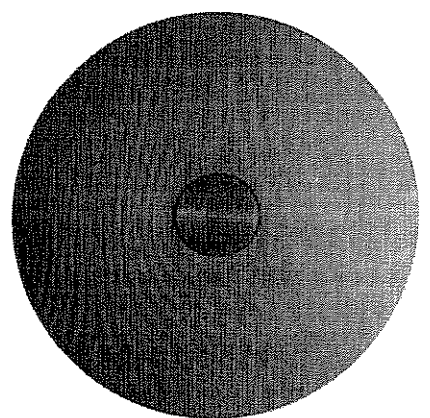
b



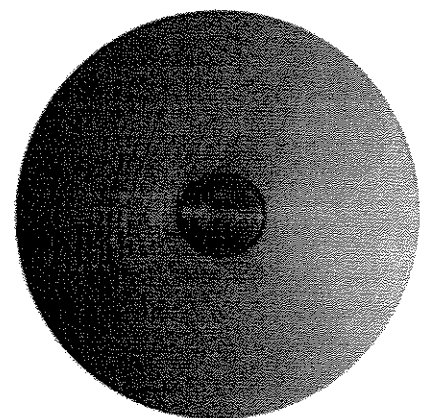
c



d

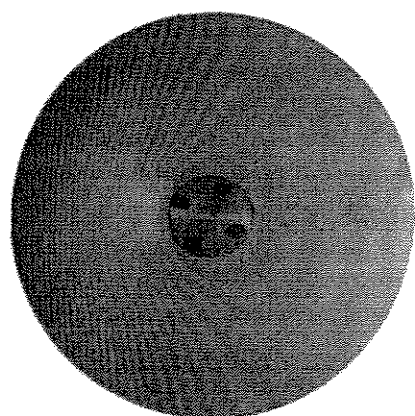


e

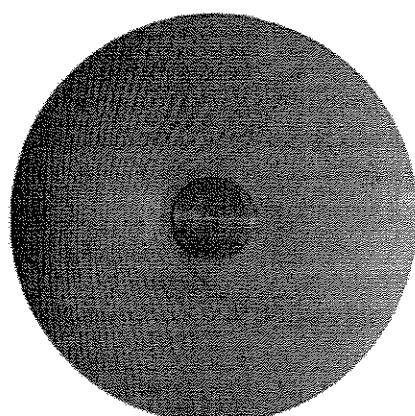


f

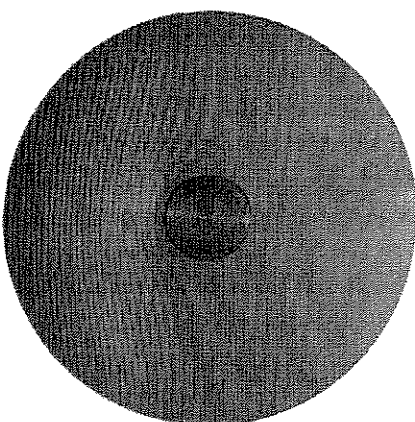
Figura 51. Padrões de franjas para $\alpha = 10$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, d) 1910 rpm.



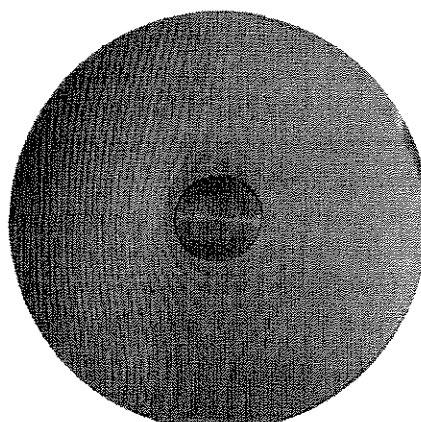
a



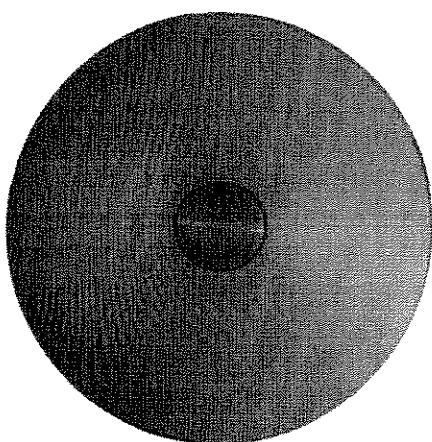
b



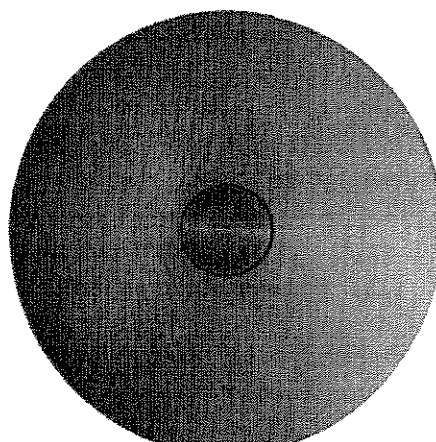
c



d

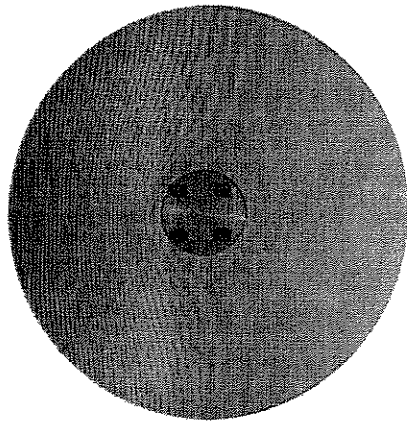


e

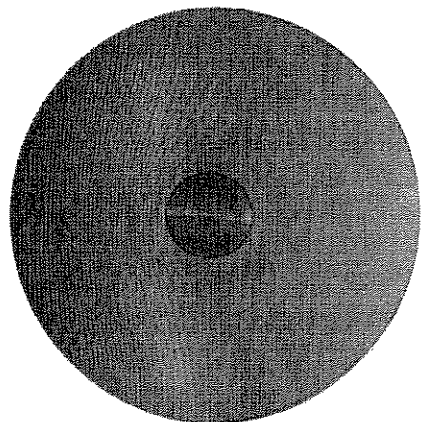


f

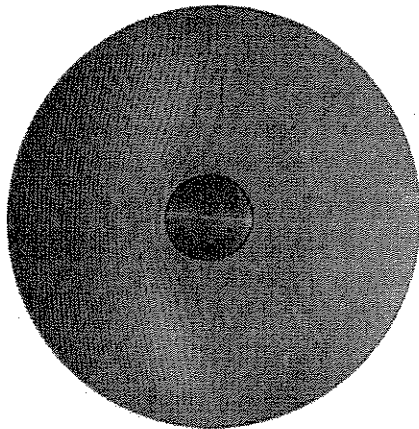
Figura 52. Padrões de franjas para $\alpha = 15$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, f) 1910 rpm.



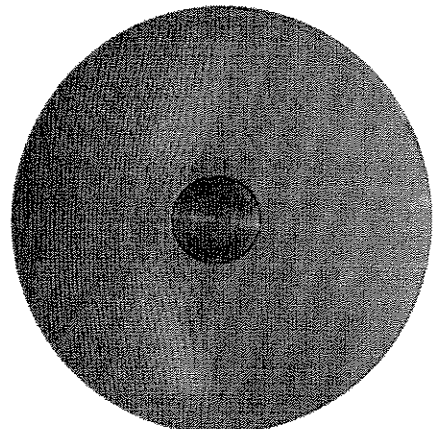
a



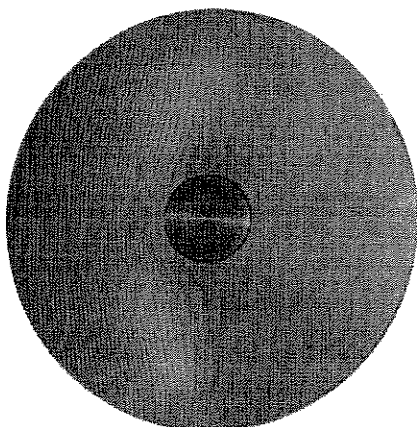
b



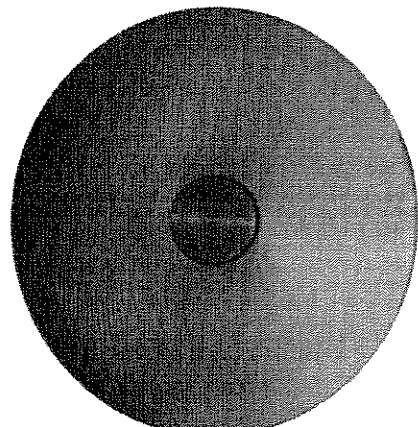
c



d

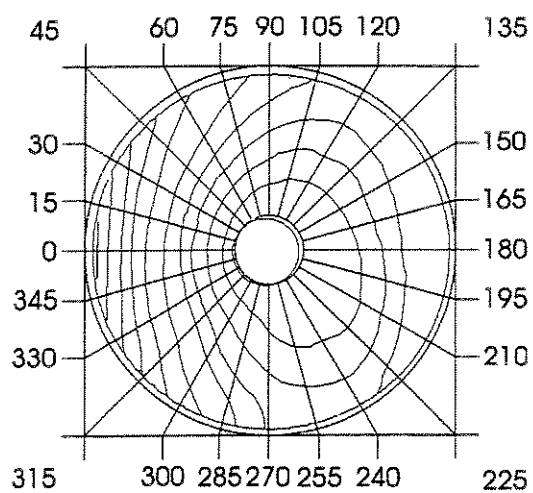


e

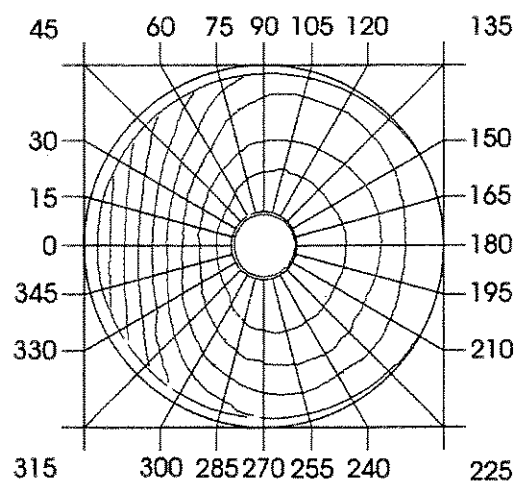


f

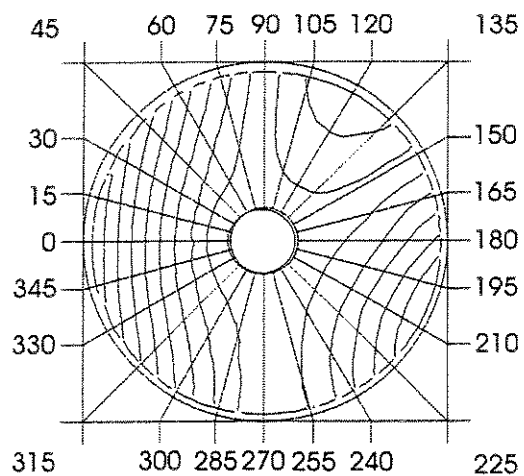
Figura 53. Padrões de franjas para $\alpha = 20$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, d)1910 rpm.



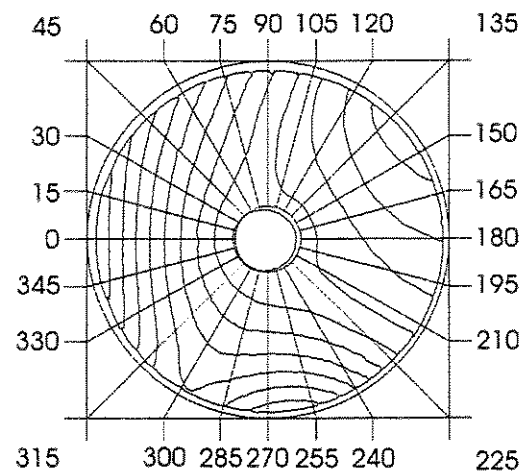
a



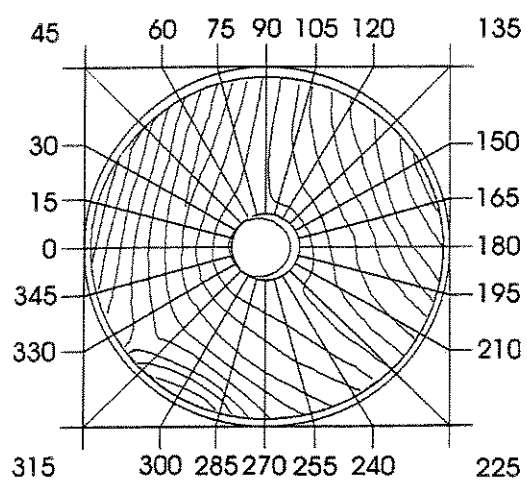
b



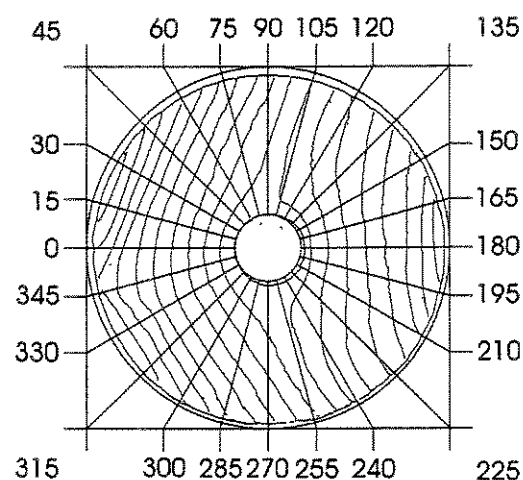
c



d



e



f

Figura 54. Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 5$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, f) 1910 rpm.

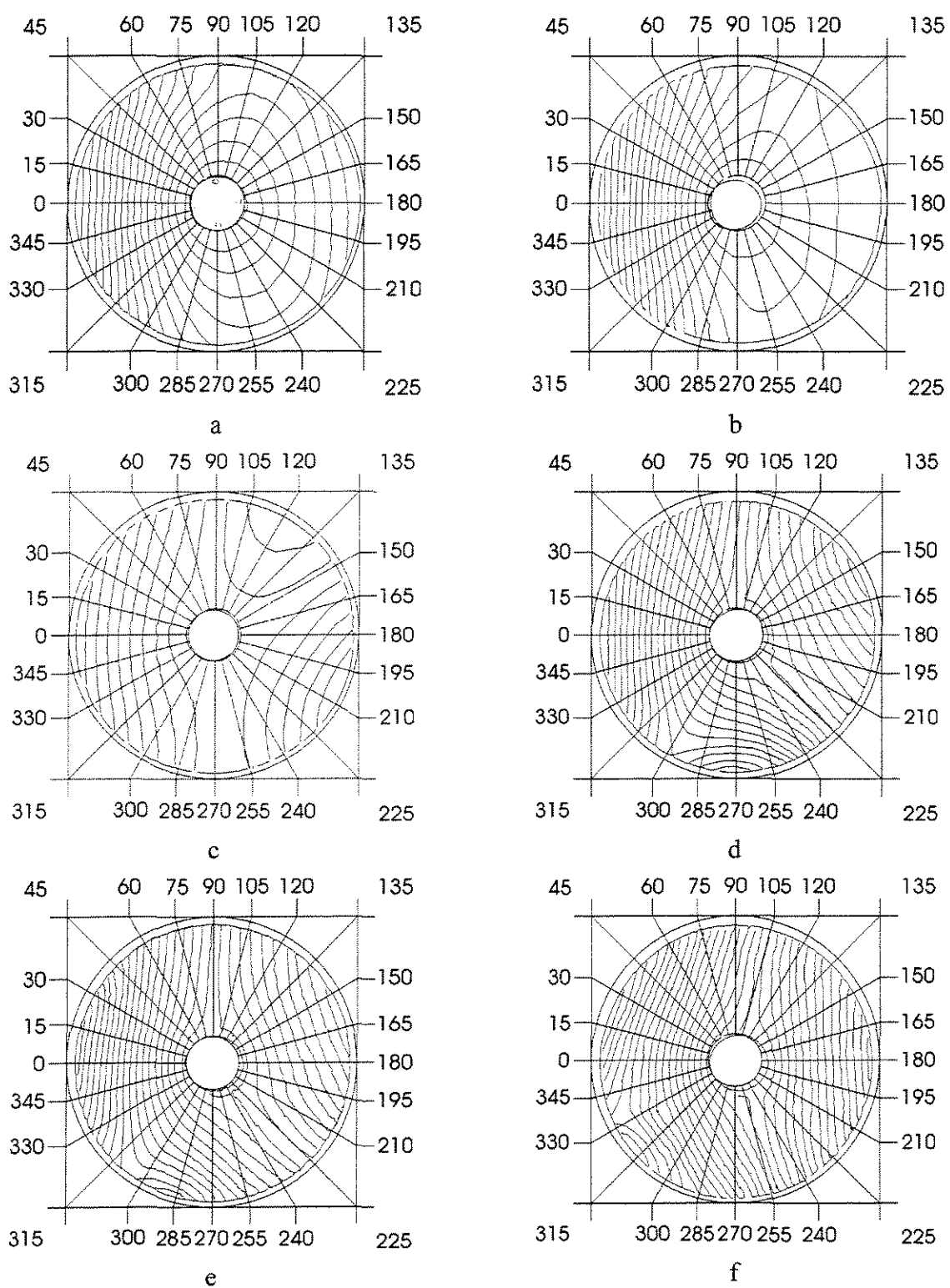


Figura 55. Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 10$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, f) 1910 rpm.

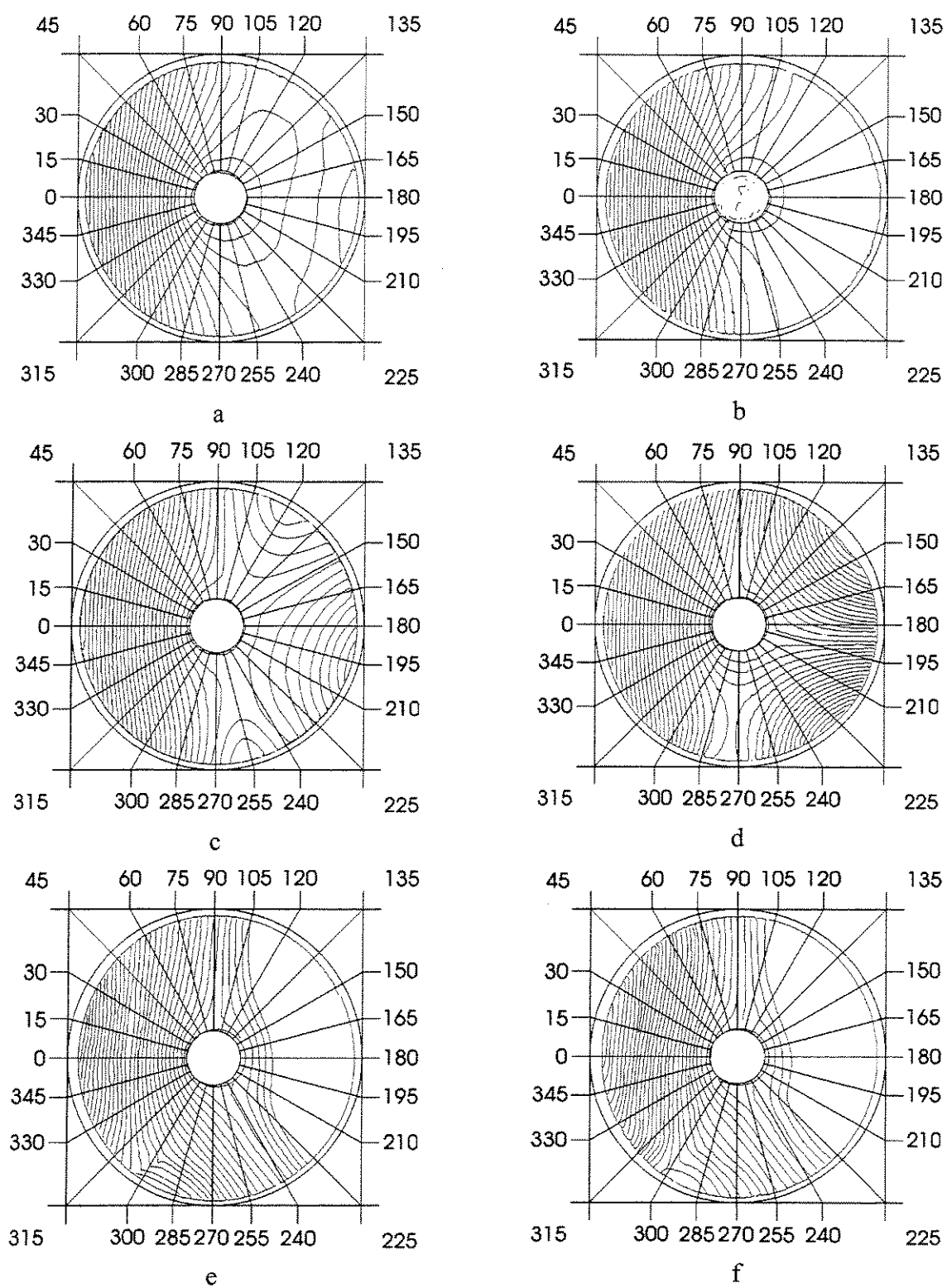


Figura 56. Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 15$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, f) 1910 rpm.

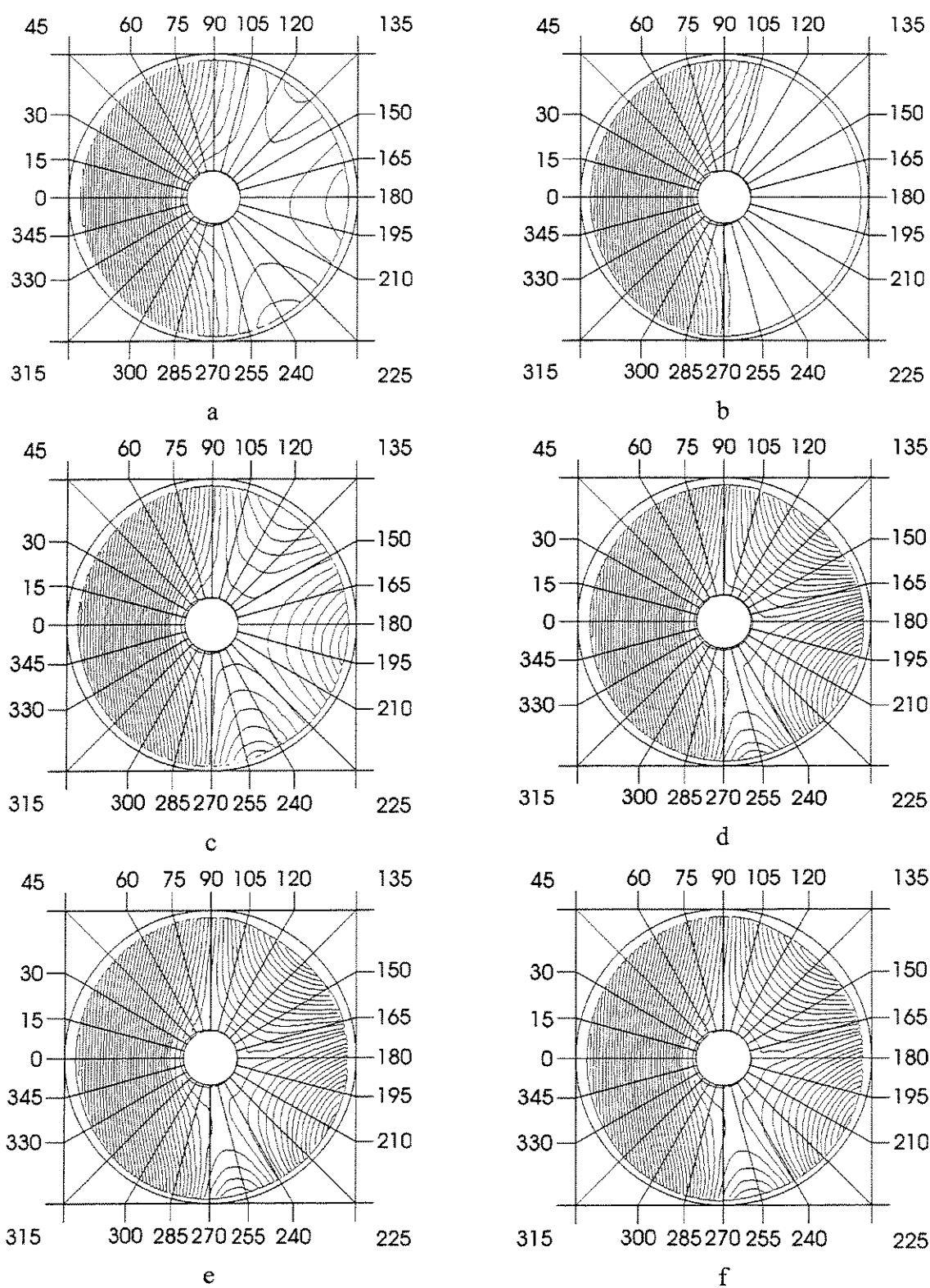


Figura 57. Padrões de franjas afinadas para $\alpha = 20$ graus. a) estático, b) 637 rpm, c) 955 rpm, d) 1273 rpm, e) 1591 rpm, f) 1910 rpm.

Quadro 5. Ordens de franja e cotas do bordo do disco em mm para perfil com inclinação de 5 graus.

Posição (°)	Regime											
	Estático		637 rpm		955 rpm		1273 rpm		1591 rpm		1910 rpm	
	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota
0	10,25	15,5	8,75	13,2	8,75	13,2	8,75	13,2	9,50	14,3	9,00	13,6
15	9,75	14,7	8,50	12,8	8,50	12,8	8,50	12,8	9,75	14,7	10,75	16,2
30	8,75	13,2	7,75	11,7	7,75	11,7	7,75	11,7	9,00	13,6	10,50	15,9
45	7,50	11,3	6,50	9,8	6,50	9,8	6,50	9,8	8,00	12,1	9,00	13,6
60	6,25	9,4	5,25	7,9	4,75	7,2	4,75	7,2	6,50	9,8	7,00	10,6
75	5,50	8,3	4,50	6,8	2,75	4,2	3,25	4,9	4,00	6,0	4,75	7,2
90	4,50	6,8	3,75	5,7	0,00	0,0	1,50	2,3	0,75	1,1	2,50	3,8
105	4,00	6,0	3,50	5,3	-2,00	-3,0	-1,50	-2,3	-3,00	-4,5	-1,00	-1,5
120	3,75	5,7	3,50	5,3	-2,75	-4,2	-3,25	-4,9	-5,00	-7,6	-3,00	-4,5
135	3,50	5,3	3,50	5,3	-2,00	-3,0	-4,50	-6,8	-6,50	-9,8	-4,75	-7,2
150	3,50	5,3	3,50	5,3	0,00	0,0	-4,50	-6,8	-8,25	-12,5	-6,50	-9,8
165	3,75	5,7	3,75	5,7	2,25	3,4	-3,75	-5,7	-8,25	-12,5	-8,25	-12,5
180	3,75	5,7	3,75	5,7	4,25	6,4	-3,00	-4,5	-7,00	-10,6	-8,75	-13,2
195	3,75	5,7	3,75	5,7	5,75	8,7	-2,25	-3,4	-5,50	-8,3	-7,75	-11,7
210	3,50	5,3	3,75	5,7	5,75	8,7	-1,25	-1,9	-3,25	-4,9	-6,00	-9,1
225	3,25	4,9	3,75	5,7	4,75	7,2	1,50	2,3	1,00	1,5	-4,25	-6,4
240	2,75	4,2	3,75	5,7	3,00	4,5	4,00	6,0	2,25	3,4	-2,25	-3,4
255	2,75	4,2	3,75	5,7	1,00	1,5	6,25	9,4	3,75	5,7	1,25	1,9
270	3,00	4,5	4,00	6,0	0,00	0,0	6,50	9,8	5,25	7,9	3,50	5,3
285	4,50	6,8	4,25	6,4	1,75	2,6	5,00	7,6	8,00	12,1	5,50	8,3
300	5,50	8,3	4,75	7,2	4,00	6,0	4,00	6,0	8,75	13,2	7,50	11,3
315	7,00	10,6	6,00	9,1	6,00	9,1	5,50	8,3	7,50	11,3	8,75	13,2
330	8,25	12,5	7,50	11,3	7,50	11,3	7,25	10,9	6,50	9,8	9,00	13,6
345	9,50	14,3	8,50	12,8	8,50	12,8	8,50	12,8	8,00	12,1	8,50	12,8
360	10,25	15,5	8,75	13,2	8,75	13,2	8,75	13,2	9,50	14,3	9,00	13,6

Quadro 6. Ordens de franja e cotas do bordo do disco em mm para perfil com inclinação de 10 graus.

Posição (°)	Regime											
	Estático		637 rpm		955 rpm		1273 rpm		1591 rpm		1910 rpm	
	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota
0	17,00	25,7	17,00	25,7	17,25	26,0	17,00	25,7	18,25	27,6	16,75	25,3
15	16,00	24,2	16,00	24,2	16,50	24,9	16,25	24,5	18,25	27,6	17,75	26,8
30	14,75	22,3	15,50	23,4	15,00	22,7	14,50	21,9	16,50	24,9	17,25	26,0
45	12,25	18,5	12,00	18,1	12,50	18,9	12,25	18,5	12,50	18,9	15,50	23,4
60	9,50	14,3	9,00	13,6	9,00	13,6	9,00	13,6	9,00	13,6	13,00	19,6
75	6,75	10,2	6,50	9,8	5,00	7,6	5,50	8,3	4,75	7,2	8,50	12,8
90	5,00	7,6	4,50	6,8	1,00	1,5	1,50	2,3	0,25	0,4	4,00	6,0
105	4,75	7,2	3,50	5,3	-3,00	-4,5	-3,25	-4,9	-3,75	-5,7	-2,00	-3,0
120	5,00	7,6	2,75	4,2	-4,20	-6,3	-6,25	-9,4	-6,50	-9,8	-6,50	-9,8
135	5,50	8,3	3,50	5,3	-3,00	-4,5	-9,00	-13,6	-8,25	-12,5	-10,00	-15,1
150	6,50	9,8	3,75	5,7	-0,25	-0,4	-10,50	-15,9	-9,50	-14,3	-12,75	-19,3
165	6,75	10,2	3,75	5,7	3,50	5,3	-10,00	-15,1	-9,75	-14,7	-14,75	-22,3
180	6,75	10,2	3,75	5,7	7,00	10,6	-8,50	-12,8	-8,75	-13,2	-15,75	-23,8
195	6,50	9,8	3,75	5,7	8,75	13,2	-6,00	-9,1	-8,00	-12,1	-14,25	-21,5
210	5,75	8,7	3,50	5,3	8,00	12,1	-4,00	-6,0	-5,00	-7,6	-12,00	-18,1
225	5,00	7,6	3,25	4,9	5,50	8,3	-1,00	-1,5	-2,00	-3,0	-9,25	-14,0
240	4,50	6,8	2,75	4,2	3,00	4,5	5,00	7,6	2,00	3,0	-4,75	-7,2
255	4,50	6,8	2,75	4,2	1,75	2,6	9,50	14,3	5,00	7,6	1,25	1,9
270	4,75	7,2	2,75	4,2	1,00	1,5	11,75	17,7	8,25	12,5	6,50	9,8
285	6,00	9,1	4,50	6,8	3,75	5,7	10,00	15,1	11,50	17,4	10,00	15,1
300	8,25	12,5	8,00	12,1	8,00	12,1	8,25	12,5	10,25	15,5	12,50	18,9
315	11,00	16,6	12,00	18,1	12,00	18,1	11,00	16,6	10,50	15,9	14,75	22,3
330	14,25	21,5	14,50	21,9	14,75	22,3	14,50	21,9	13,75	20,8	14,00	21,1
345	16,00	24,2	16,00	24,2	16,50	24,9	16,50	24,9	17,00	25,7	14,50	21,9
360	17,00	25,7	17,00	25,7	17,25	26,0	17,00	25,7	18,50	27,9	16,75	25,3

Quadro 7. Ordens de franja e cotas do bordo do disco em mm para perfil com inclinação de 15 graus.

Posição (°)	Regime											
	Estático		637 rpm		955 rpm		1273 rpm		1591 rpm		1910 rpm	
	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota
0	27,00	40,8	27,00	40,8	27,00	40,8	27,00	40,8	28,50	43,0	29,50	44,5
15	26,00	39,3	25,50	38,5	25,50	38,5	26,75	40,4	28,75	43,4	29,00	43,8
30	23,00	34,7	23,00	34,7	23,50	35,5	24,00	36,2	25,00	37,8	26,75	40,4
45	19,00	28,7	19,00	28,7	19,50	29,4	19,50	29,4	19,50	29,4	22,50	34,0
60	14,00	21,1	14,50	21,9	14,00	21,1	15,00	22,7	14,00	21,1	15,00	22,7
75	9,00	13,6	9,25	14,0	8,00	12,1	9,00	13,6	8,00	12,1	7,00	10,6
90	4,75	7,2	5,00	7,6	2,00	3,0	2,00	3,0	2,00	3,0	1,00	1,5
105	2,75	4,2	2,75	4,2	-2,75	-4,2	-7,00	-10,6	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
120	2,75	4,2	1,50	2,3	-4,50	-6,8	-14,00	-21,1	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
135	2,75	4,2	1,75	2,6	-3,00	-4,5	-18,50	-27,9	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
150	3,50	5,3	1,75	2,6	0,50	0,8	-18,00	-27,2	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
165	4,00	6,0	1,75	2,6	4,50	6,8	-13,50	-20,4	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
180	4,75	7,2	1,75	2,6	8,00	12,1	-5,00	-7,6	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
195	4,50	6,8	1,75	2,6	9,50	14,3	5,00	7,6	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
210	4,00	6,0	1,75	2,6	7,50	11,3	13,50	20,4	-5,00	-7,6	-4,00	-6,0
225	3,50	5,3	1,75	2,6	4,25	6,4	17,75	26,8	-5,00	0,0	-4,00	-6,0
240	2,75	4,2	1,50	2,3	0,50	0,8	15,50	23,4	0,00	0,0	-1,00	-1,5
255	3,25	4,9	2,00	3,0	-2,75	-4,2	9,00	13,6	5,50	8,3	4,50	6,8
270	4,75	7,2	3,50	5,3	0,00	0,0	4,00	6,0	11,00	16,6	8,25	12,5
285	8,00	12,1	8,00	12,1	6,00	9,1	5,00	7,6	15,25	23,0	11,50	17,4
300	13,00	19,6	14,00	21,1	13,00	19,6	13,00	19,6	15,75	23,8	11,50	17,4
315	18,50	27,9	19,00	28,7	19,00	28,7	19,00	28,7	17,00	25,7	17,00	25,7
330	23,00	34,7	23,00	34,7	23,00	34,7	23,00	34,7	22,00	33,2	23,00	34,7
345	26,00	39,3	25,75	38,9	25,50	38,5	26,00	39,3	26,25	39,6	27,25	41,1
360	27,00	40,8	27,00	40,8	27,00	40,8	27,00	40,8	28,50	43,0	29,50	44,5

Quadro 8. Ordens de franja e cotas do bordo do disco em mm para perfil com inclinação de 20 graus.

Posição (°)	Regime											
	Estático		637 rpm		955 rpm		1273 rpm		1591 rpm		1910 rpm	
	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota	Ordem	Cota
0	38,00	57,4	37,00	55,9	37,00	55,9	37,00	55,9	37,00	55,9	37,00	55,9
15	36,00	54,4	36,00	54,4	35,50	53,6	35,50	53,6	35,50	53,6	37,50	56,6
30	32,00	48,3	32,00	48,3	32,00	48,3	32,00	48,3	32,00	48,3	35,00	52,9
45	26,50	40,0	26,50	40,0	27,00	40,8	27,00	40,8	27,00	40,7	29,00	43,8
60	19,00	28,7	20,00	30,2	20,00	30,2	20,00	30,2	20,50	30,9	22,00	33,2
75	11,00	16,6	11,25	17,0	11,00	16,6	11,00	16,6	11,00	16,6	12,00	18,1
90	4,50	6,8	5,50	8,3	2,25	3,4	1,50	2,3	1,25	1,9	1,75	2,6
105	1,00	1,5	1,50	2,3	-4,00	-6,0	-8,00	-12,1	-8,00	-12,1	-8,00	-12,1
120	-1,75	-2,6	0,00	0,0	-6,00	-9,1	-13,50	-20,4	-14,25	-21,5	-14,25	-21,5
135	-2,00	-3,0	0,00	0,0	-5,00	-7,6	-15,50	-23,4	-15,75	-23,8	-15,75	-23,8
150	0,00	0,0	0,00	0,0	-1,25	-1,9	-11,00	-16,6	-11,00	-16,6	-11,00	-16,6
165	1,75	2,6	0,00	0,0	4,00	6,0	-3,50	-5,3	-3,50	-5,2	-3,50	-5,3
180	2,75	4,2	0,00	0,0	7,00	10,6	6,50	9,8	6,50	9,8	6,50	9,8
195	2,25	3,4	-1,00	-1,5	7,25	10,9	13,25	20,0	13,25	20,0	13,25	20,0
210	1,00	1,5	-1,00	-1,5	3,75	5,7	14,75	22,3	15,25	23,0	15,25	23,0
225	-1,50	-2,3	-1,00	-1,5	-1,00	-1,5	11,00	16,6	11,00	16,6	11,00	16,6
240	-2,50	-3,8	-1,00	-1,5	-4,50	-6,8	2,00	3,0	2,00	3,0	2,00	3,0
255	-1,50	-2,3	-1,00	-1,5	-6,00	-9,1	-4,50	-6,8	-4,25	-6,4	-4,25	-6,4
270	2,75	4,2	0,50	0,8	-1,25	-1,9	-2,00	-3,0	-2,00	-3,0	-2,00	-3,0
285	9,00	13,6	9,00	13,6	9,00	13,6	9,00	13,6	9,00	13,6	11,00	16,6
300	18,00	27,2	19,00	28,7	19,00	28,7	19,00	28,7	19,00	28,7	20,00	30,2
315	26,00	39,3	26,00	39,3	26,00	39,3	26,50	40,0	26,50	40,0	26,50	40,0
330	32,00	48,3	32,00	48,3	32,00	48,3	32,00	48,3	32,00	48,3	33,00	49,8
345	36,50	55,1	35,50	53,6	35,50	53,6	35,50	53,6	35,50	53,6	35,50	53,6
360	38,00	57,4	37,00	55,9	37,00	55,9	37,00	55,9	37,00	55,9	37,00	55,9

Quadro 9. Comparação entre os valores das cotas em mm no regime estático com $\alpha = 5$ graus.

Posição (°)	Numérico	Paquímetro	Moiré	Dif. Moiré-Núm.	Dif. Moiré-Paq.
270	0,00	5,1	4,5	4,50	-0,6
285	3,38	7,1	6,8	3,42	-0,3
300	6,54	7,7	8,3	1,76	0,6
315	9,24	9,7	10,6	1,36	0,9
330	11,32	11,8	12,5	1,18	0,7
345	12,63	13,4	14,3	1,67	0,9
0	13,07	14,6	15,5	2,43	0,9
15	12,63	13,8	14,7	2,07	0,9
30	11,32	12,6	13,2	1,88	0,6
45	9,24	9,6	11,3	2,06	1,7
60	6,54	8,1	9,4	2,86	1,3
75	3,38	6,9	8,3	4,92	1,4
90	0,00	5,8	6,8	6,80	1,0
Média				2,84	0,77
Máximo				6,80	1,70
Mínimo				1,18	0,30
Amplitude				7,98	2,30
Desvio Padrão				1,65	0,63

Quadro 10. Comparação entre os valores das cotas em mm no regime estático com $\alpha = 10$ graus.

Posição (°)	Numérico	Paquímetro	Moiré	Dif. Moiré-Núm.	Dif. Moiré-Paq.
270	0,00	7,7	7,2	7,20	-0,5
285	6,74	9,6	9,1	2,36	-0,5
300	13,02	13,3	12,5	-0,52	-0,8
315	18,42	17,7	16,6	-1,82	-1,1
330	22,56	22,9	21,5	-1,06	-1,4
345	25,16	24,7	24,2	-0,96	-0,5
0	26,05	26,2	25,7	-0,35	-0,5
15	25,16	24,4	24,2	-0,96	-0,2
30	22,56	22,9	22,3	-0,26	-0,6
45	18,42	18,1	18,5	0,08	0,4
60	13,02	13,7	14,3	1,28	0,6
75	6,74	10,3	10,2	3,46	-0,1
90	0,00	7,8	7,6	7,60	-0,2
Média				1,24	0,42
Máximo				7,60	0,60
Mínimo				0,08	0,10
Amplitude				9,42	2,00
Desvio Padrão				3,10	0,54

Quadro 11. Comparação entre os valores das cotas em mm no regime estático com $\alpha = 15$ graus.

Posição (°)	Numérico	Paquímetro	Moiré	Dif. Moiré-Núm.	Dif. Moiré-Paq.
270	0,00	7,8	7,2	7,20	-0,6
285	10,05	12,4	12,1	2,05	-0,3
300	19,41	19,6	19,6	0,19	0,0
315	27,45	27,7	27,9	0,45	0,2
330	33,62	34,2	34,7	1,08	0,5
345	37,50	38,8	39,3	1,80	0,5
0	38,82	40,1	40,8	1,98	0,7
15	37,50	38,4	39,3	1,80	0,9
30	33,62	34,1	34,7	1,08	0,6
45	27,45	28,6	28,7	1,25	0,1
60	19,41	20,9	21,1	1,69	0,2
75	10,05	13,7	13,6	3,55	-0,1
90	0,00	7,6	7,2	7,20	-0,4
Média				2,41	0,18
Máximo				7,20	0,90
Mínimo				0,19	0,00
Amplitude				7,39	1,50
Desvio Padrão				2,28	0,45

Quadro 12. Comparação entre os valores das cotas em mm no regime estático com $\alpha = 20$ graus.

Posição (°)	Numérico	Paquímetro	Moiré	Dif. Moiré-Núm.	Dif. Moiré-Paq.
270	0,00	5,1	4,2	4,20	-0,9
285	13,28	13,9	13,6	0,32	-0,3
300	25,65	27,4	27,2	1,55	-0,2
315	36,27	38,7	39,3	3,03	0,6
330	44,43	47,7	48,3	3,87	0,6
345	49,55	53,2	55,1	5,55	1,9
0	51,30	56,6	57,4	6,10	0,8
15	49,55	53,2	54,4	4,85	1,2
30	44,43	46,5	48,3	3,87	1,8
45	36,27	38,8	40,0	3,73	1,2
60	25,65	29,2	28,7	3,05	-0,5
75	13,28	17,1	16,6	3,32	-0,5
90	0,00	7,4	6,8	6,80	-0,6
Média				3,86	0,39
Máximo				6,80	1,90
Mínimo				0,32	0,20
Amplitude				7,12	2,80
Desvio Padrão				1,76	0,95

Quadro 13. Resumo das diferenças de cota *Moiré* - numérico e *Moiré* – paquímetro em mm.

Índice	Inclinação do Perfil							
	5 graus		10 graus		15 graus		20 graus	
	Num.	Paq.	Num.	Paq.	Num.	Paq.	Num.	Paq.
Média	2,84	0,77	1,24	0,42	2,41	0,18	3,86	0,39
Máximo	6,8	1,70	7,60	0,60	7,20	0,90	6,80	1,90
Mínimo	1,18	0,30	0,08	0,10	0,19	0,00	0,32	0,20
Amplitude	7,98	2,30	9,42	2,00	7,39	1,50	7,12	2,80
Desvio Padrão	1,65	0,63	3,10	0,54	2,28	0,45	1,76	0,95

O resumo das diferenças entre as cotas do bordo do disco obtidas pela técnica de *Moiré*, numericamente e com paquímetro, conforme o quadro 13, mostra uma grande precisão da técnica de *Moiré* de sombra. Na comparação entre a técnica de *Moiré* e os valores obtidos numericamente, a maior diferença observada foi de 7,20mm para a inclinação do perfil de 15 graus e a menor diferença de 0,08mm para a inclinação de 10 graus. A maior amplitude registrada para as diferenças foi de 9,42mm e o maior desvio padrão encontrado para as diferenças foi de 3,10mm.

6.2. Capacidade de Acompanhamento do Perfil.

Para se verificar a capacidade de acompanhamento do perfil pelo disco no regime dinâmico, os valores obtidos através da técnica de *Moiré* de sombra para cada uma das velocidades de acionamento foram comparados com os valores numéricos determinados para o perfil do bordo para cada um dos ângulos de inclinação. Essa comparação foi feita com o cálculo do desvio padrão das diferenças entre as duas medidas e é mostrada nos quadros 14 a 17.

Uma melhor visualização da capacidade de acompanhamento do perfil pelo disco nas cinco diferentes velocidades de acionamento e para cada um dos quatro ângulos de inclinação do perfil, pode ser obtida observando-se os gráficos das figuras 58 a 77 mostrados a seguir.

Quadro 14. Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco.
Perfil com inclinação de 5 graus.

Posição (°)	Numérico	Estát.	Difer.	637 rpm	Difer.	955 rpm	Difer.	1273 rpm	Difer.	1591 rpm	Difer.	1910 rpm	Difer.
270	0	4,5	4,5	6,0	6,0	0,0	0,0	9,8	9,8	7,9	7,9	5,3	5,3
285	3,38	6,8	3,4	6,4	3,0	2,6	-0,7	7,6	4,2	12,1	8,7	8,3	4,9
300	6,54	8,3	1,8	7,2	0,6	6,0	-0,5	6,0	-0,5	13,2	6,7	11,3	4,8
315	9,24	10,6	1,3	9,1	-0,2	9,1	-0,2	8,3	-0,9	11,3	2,1	13,2	4,0
330	11,32	12,5	1,1	11,3	0,0	11,3	0,0	10,9	-0,4	9,8	-1,5	13,6	2,3
345	12,63	14,3	1,7	12,8	0,2	12,8	0,2	12,8	0,2	12,1	-0,6	12,8	0,2
0	13,07	15,5	2,4	13,2	0,1	13,2	0,1	13,2	0,1	14,3	1,3	13,6	0,5
15	12,63	14,7	2,1	12,8	0,2	12,8	0,2	12,8	0,2	14,7	2,1	16,2	3,6
30	11,32	13,2	1,9	11,7	0,4	11,7	0,4	11,7	0,4	13,6	2,3	15,9	4,5
45	9,24	11,3	2,1	9,8	0,6	9,8	0,6	9,8	0,6	12,1	2,8	13,6	4,4
60	6,54	9,4	2,9	7,9	1,4	7,2	0,6	7,2	0,6	9,8	3,3	10,6	4,0
75	3,38	8,3	4,9	6,8	3,4	4,2	0,8	4,9	1,5	6,0	2,7	7,2	3,8
90	0	6,8	6,8	5,7	5,7	0,0	0,0	2,3	2,3	1,1	1,1	3,8	3,8
Desvio Padrão			1,7		2,2		0,4		2,9		3,1		1,6

Quadro 15. Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco.
Perfil com inclinação de 10 graus.

Posição (°)	Numérico	Estát.	Difer.	637 rpm	Difer.	955 rpm	Difer.	1273 rpm	Difer.	1591 rpm	Difer.	1910 rpm	Difer.
270	0	7,2	7,2	4,2	4,2	1,5	1,5	17,7	17,7	12,5	12,5	9,8	9,8
285	6,74	9,1	2,3	6,8	0,1	5,7	-1,1	15,1	8,4	17,4	10,6	15,1	8,4
300	13,02	12,5	-0,6	12,1	-0,9	12,1	-0,9	12,5	-0,6	15,5	2,5	18,9	5,9
315	18,42	16,6	-1,8	18,1	-0,3	18,1	-0,3	16,6	-1,8	15,9	-2,6	22,3	3,9
330	22,56	21,5	-1,0	21,9	-0,7	22,3	-0,3	21,9	-0,7	20,8	-1,8	21,1	-1,4
345	25,16	24,2	-1,0	24,2	-1,0	24,9	-0,2	24,9	-0,2	25,7	0,5	21,9	-3,3
0	26,05	25,7	-0,4	25,7	-0,4	26,0	0,0	25,7	-0,4	27,6	1,5	25,3	-0,8
15	25,16	24,2	-1,0	24,2	-1,0	24,9	-0,2	24,5	-0,6	27,6	2,4	26,8	1,6
30	22,56	22,3	-0,3	23,4	0,8	22,7	0,1	21,9	-0,7	24,9	2,4	26,0	3,5
45	18,42	18,5	0,1	18,1	-0,3	18,9	0,5	18,5	0,1	18,9	0,5	23,4	5,0
60	13,02	14,3	1,3	13,6	0,6	13,6	0,6	13,6	0,6	13,6	0,6	19,6	6,6
75	6,74	10,2	3,5	9,8	3,1	7,6	0,8	8,3	1,6	7,2	0,4	12,8	6,1
90	0	7,6	7,6	6,8	6,8	1,5	1,5	2,3	2,3	0,4	0,4	6,0	6,0
Desvio Padrão			3,1		2,4		0,8		5,4		4,4		3,9

Quadro 16. Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco.
Perfil com inclinação de 15 graus.

Posição (°)	Numérico	Estát.	Difer.	637 rpm	Difer.	955 rpm	Difer.	1273 rpm	Difer.	1591 rpm	Difer.	1910 rpm	Difer.
270	0,00	7,2	7,2	5,3	5,3	0,0	0,0	6,0	6,0	16,6	16,6	12,5	12,5
285	10,05	12,1	2,0	12,1	2,0	9,1	-1,0	7,6	-2,5	23,0	13,0	17,4	7,3
300	19,41	19,6	0,2	21,1	1,7	19,6	0,2	19,6	0,2	23,8	4,4	17,4	-2,0
315	27,45	27,9	0,5	28,7	1,2	28,7	1,2	28,7	1,2	25,7	-1,8	25,7	-1,8
330	33,62	34,7	1,1	34,7	1,1	34,7	1,1	34,7	1,1	33,2	-0,4	34,7	1,1
345	37,50	39,3	1,8	38,9	1,4	38,5	1,0	39,3	1,8	39,6	2,1	41,1	3,6
0	38,82	40,8	2,0	40,8	2,0	40,8	2,0	40,8	2,0	43,0	4,2	44,5	5,7
15	37,50	39,3	1,8	38,5	1,0	38,5	1,0	40,4	2,9	43,4	5,9	43,8	6,3
30	33,62	34,7	1,1	34,7	1,1	35,5	1,9	36,2	2,6	37,8	4,1	40,4	6,8
45	27,45	28,7	1,2	28,7	1,2	29,4	2,0	29,4	2,0	29,4	2,0	34,0	6,5
60	19,41	21,1	1,7	21,9	2,5	21,1	1,7	22,7	3,2	21,1	1,7	22,7	3,2
75	10,05	13,6	3,5	14,0	3,9	12,1	2,0	13,6	3,5	12,1	2,0	10,6	0,5
90	0,00	7,2	7,2	7,6	7,6	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	1,5	1,5
Desvio Padrão			2,2		1,9		1,05		1,9		5,1		4,1

Quadro 17. Comparação entre valores numéricos e experimentais das cotas do bordo do disco.
Perfil com inclinação de 20 graus.

Posição (°)	Numérico	Estát.	Difer.	637 rpm	Difer.	955 rpm	Difer.	1273 rpm	Difer.	1591 rpm	Difer.	1910 rpm	Difer.
270	0	4,2	4,2	0,8	0,8	-1,9	-1,9	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
285	13,28	13,6	0,3	13,6	0,3	13,6	0,3	13,6	0,3	13,6	0,3	16,6	3,3
300	25,65	27,2	1,5	28,7	3,0	28,7	3,0	28,7	3,0	28,7	3,0	30,2	4,5
315	36,27	39,3	3,0	39,3	3,0	39,3	3,0	40,0	3,7	40,0	3,7	40,0	3,7
330	44,43	48,3	3,9	48,3	3,9	48,3	3,9	48,3	3,9	48,3	3,9	49,8	5,4
345	49,55	55,1	5,6	53,6	4,1	53,6	4,1	53,6	4,1	53,6	4,1	53,6	4,1
0	51,30	57,4	6,1	55,9	4,6	55,9	4,6	55,9	4,6	55,9	4,6	55,9	4,6
15	49,55	54,4	4,8	54,4	4,8	53,6	4,1	53,6	4,1	53,6	4,1	56,6	7,1
30	44,43	48,3	3,9	48,3	3,9	48,3	3,9	48,3	3,9	48,3	-3,7	52,9	8,4
45	36,27	40,0	3,7	40,0	3,7	40,8	4,5	40,8	4,5	40,8	-5,3	43,8	7,5
60	25,65	28,7	3,0	30,2	4,5	30,2	4,5	30,2	4,5	31,0	-9,0	33,2	7,6
75	13,28	16,6	3,3	17,0	3,7	16,6	3,3	16,6	3,3	16,6	-11,4	18,1	4,8
90	0	6,8	6,8	8,3	8,3	3,4	3,4	2,3	2,3	1,9	-12,1	2,6	2,6
Desvio Padrão			1,8		1,9		1,9		2,2		2,2		2,9

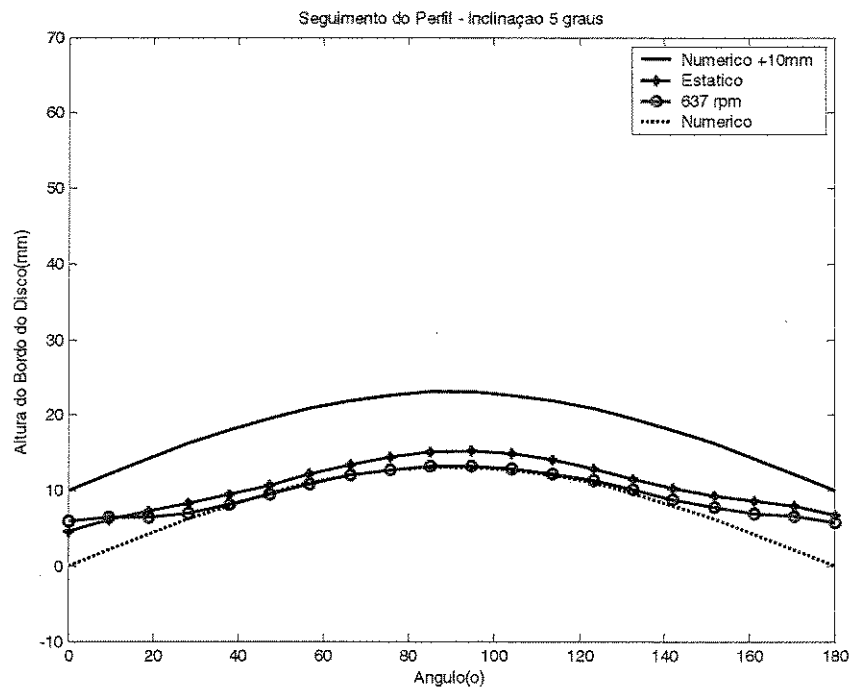


Figura 58. Seguimento do perfil para 5 graus e 637 rpm ou 10ms^{-1} .

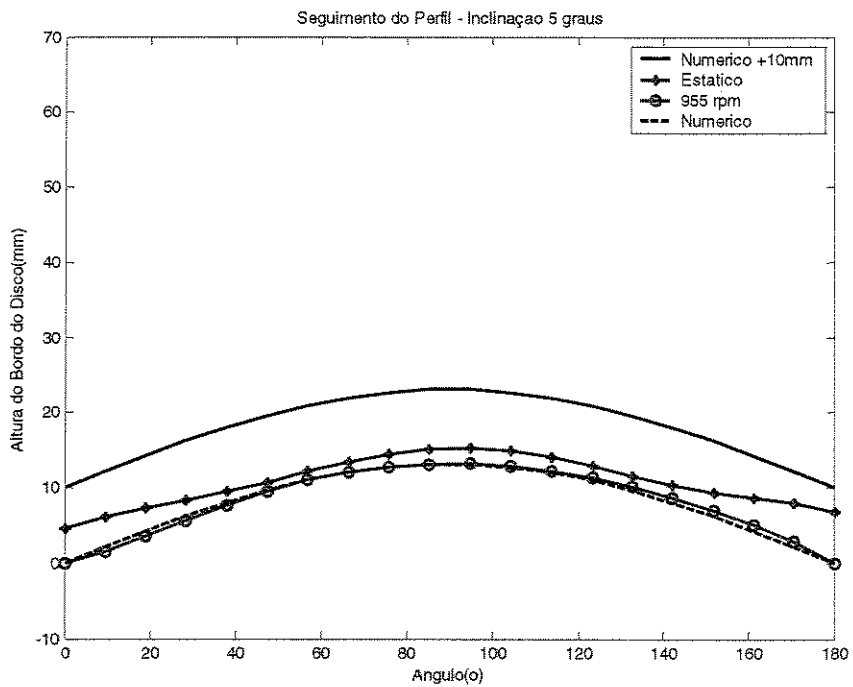


Figura 59. Seguimento do perfil para 5 graus e 955 rpm ou 15ms^{-1} .

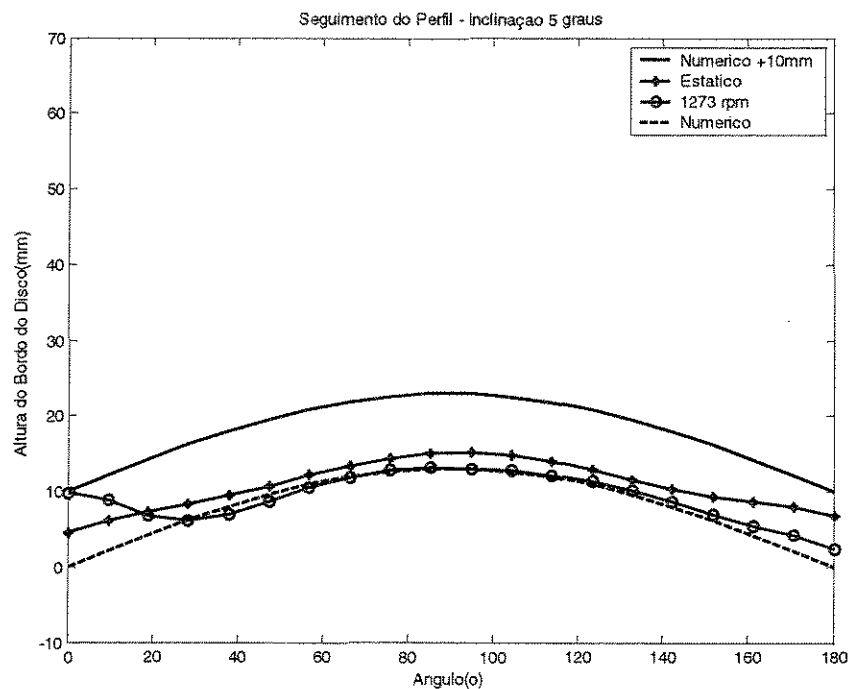


Figura 60. Seguimento do perfil para 5 graus e 1273 rpm ou 20ms^{-1} .

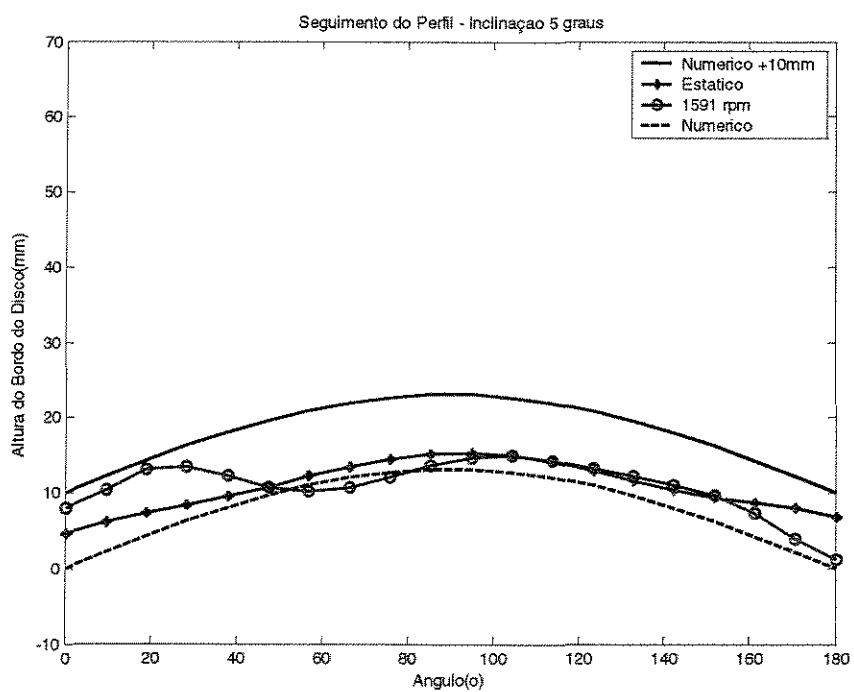


Figura 61. Seguimento do perfil para 5 graus e 1591 rpm ou 25ms^{-1} .

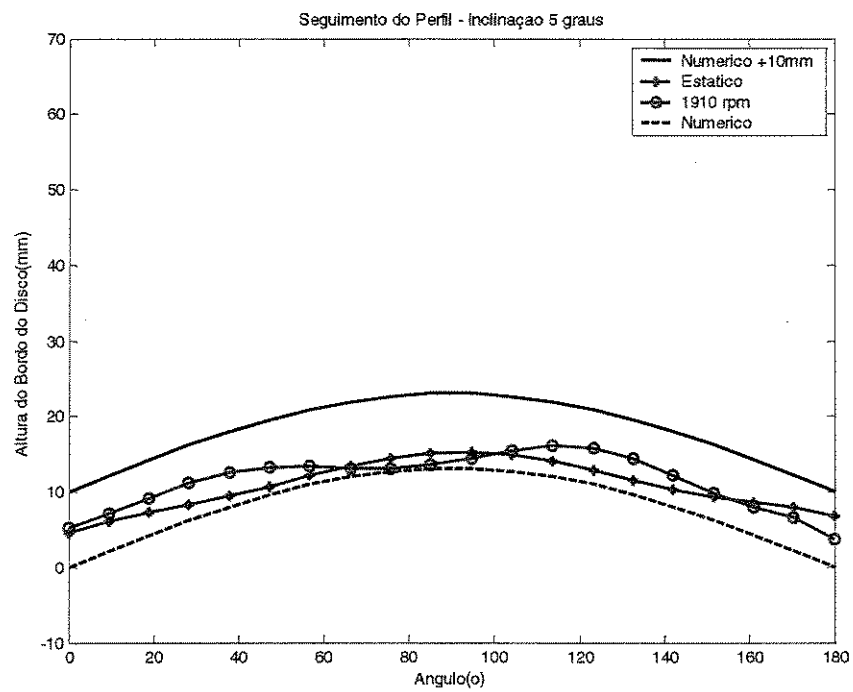


Figura 62. Seguimento do perfil para 5 graus e 1910 rpm ou 30ms^{-1} .

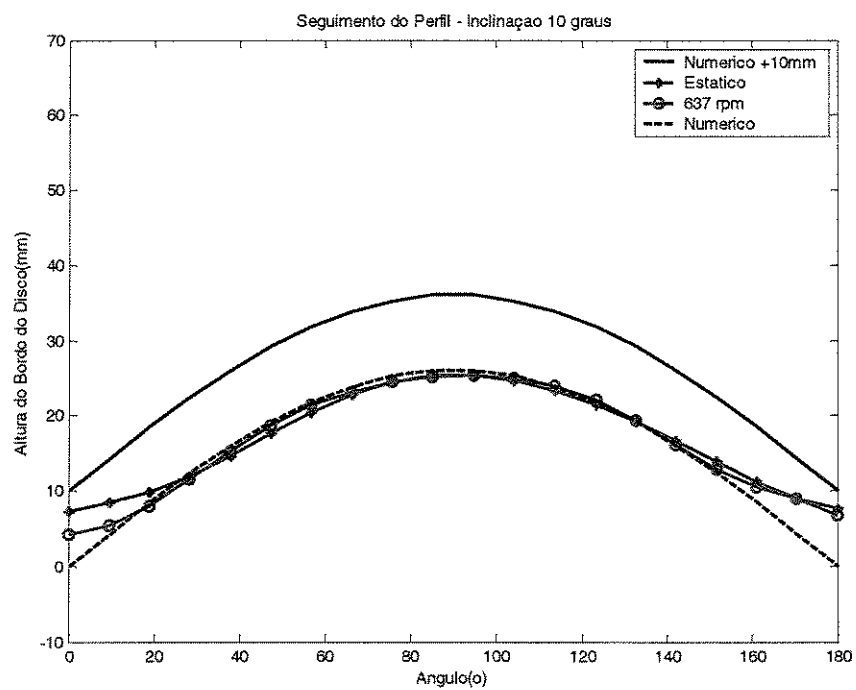


Figura 63. Seguimento do perfil para 10 graus e 637 rpm ou 10ms^{-1} .

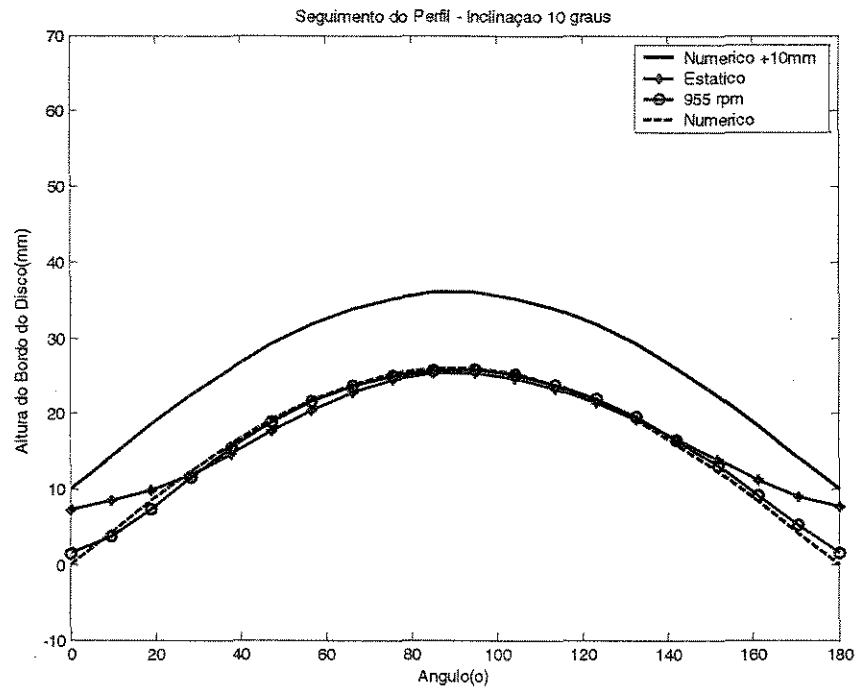


Figura 64. Seguimento do perfil para 10 graus e 955 rpm ou 15ms^{-1} .

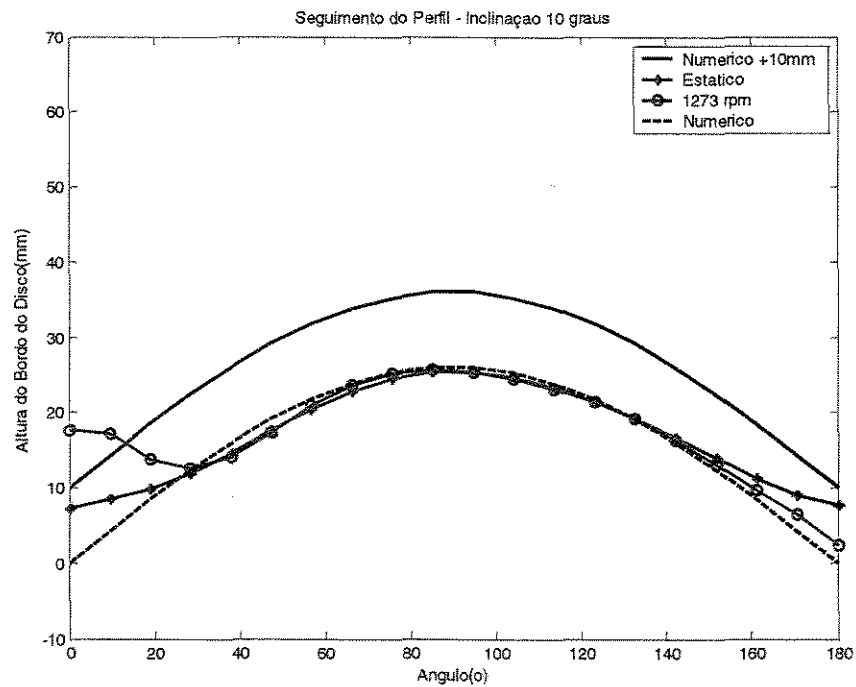


Figura 65. Seguimento do perfil para 10 graus e 1273 rpm ou 20ms^{-1} .

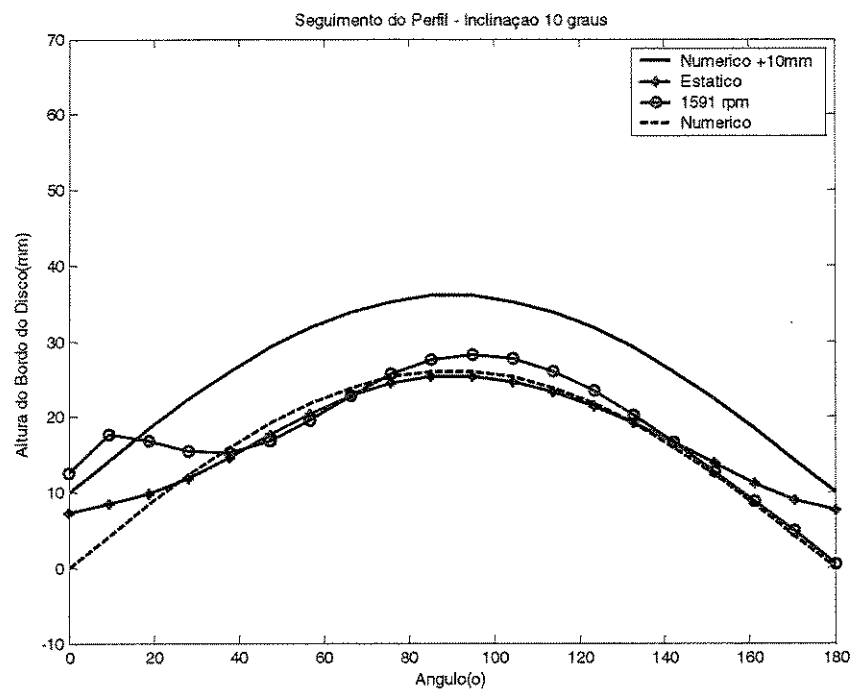


Figura 66. Seguimento do perfil para 10 graus e 1591 rpm ou 25ms^{-1} .

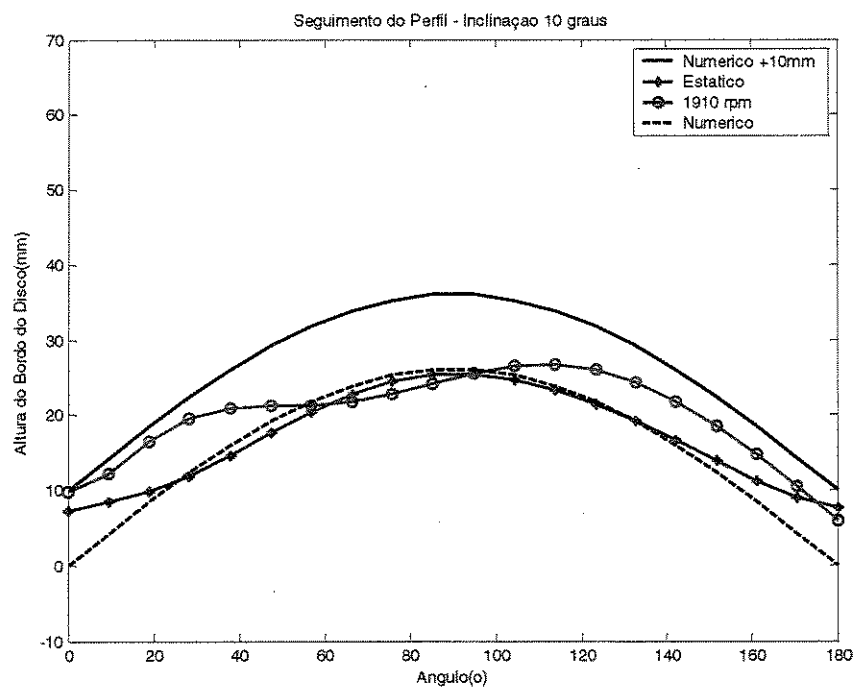


Figura 67. Seguimento do perfil para 10 graus e 1910 rpm ou 30ms^{-1} .

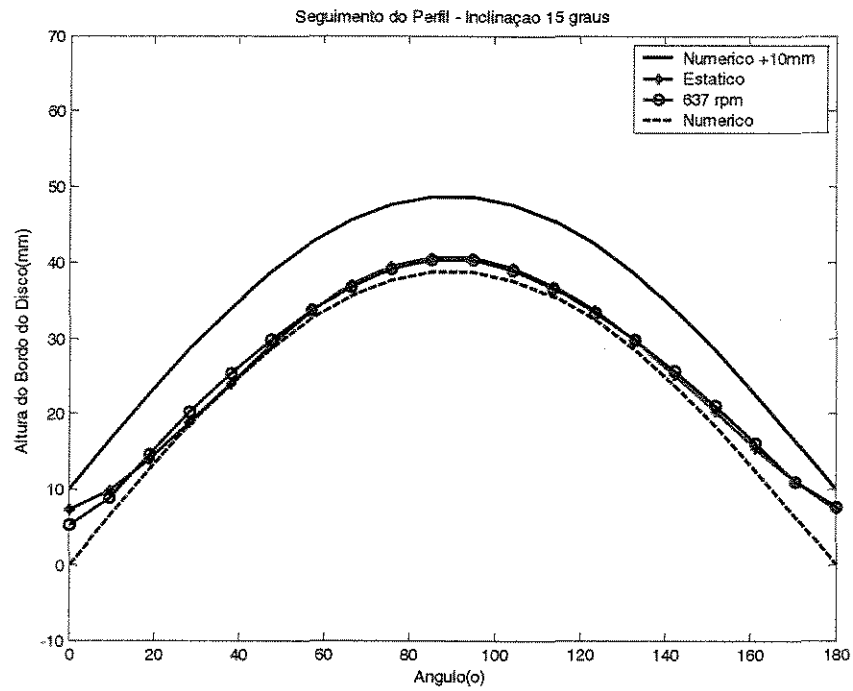


Figura 68. Seguimento do perfil para 15 graus e 637 rpm ou 10ms^{-1} .

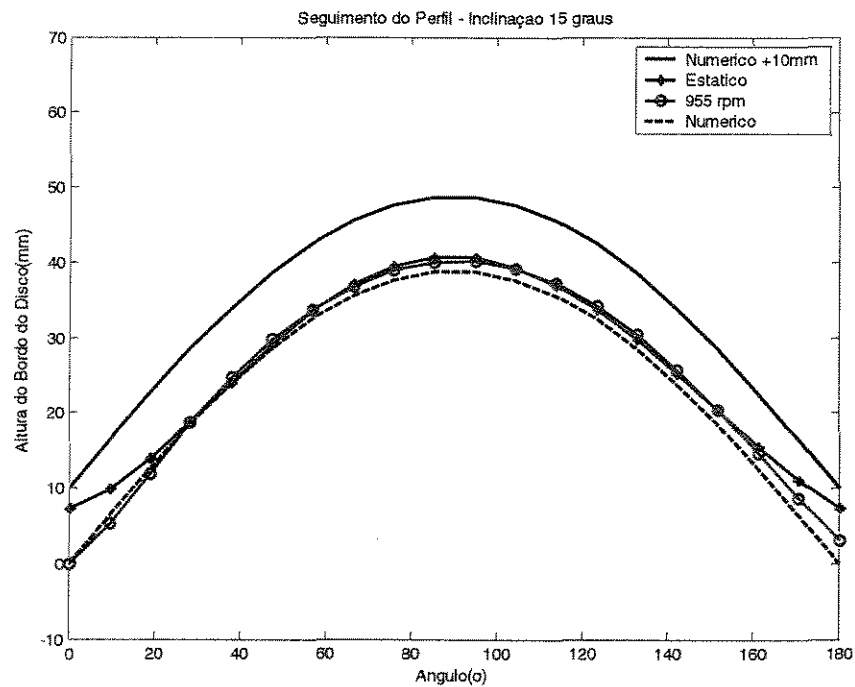


Figura 69. Seguimento do perfil para 15 graus e 955 rpm ou 15ms^{-1} .

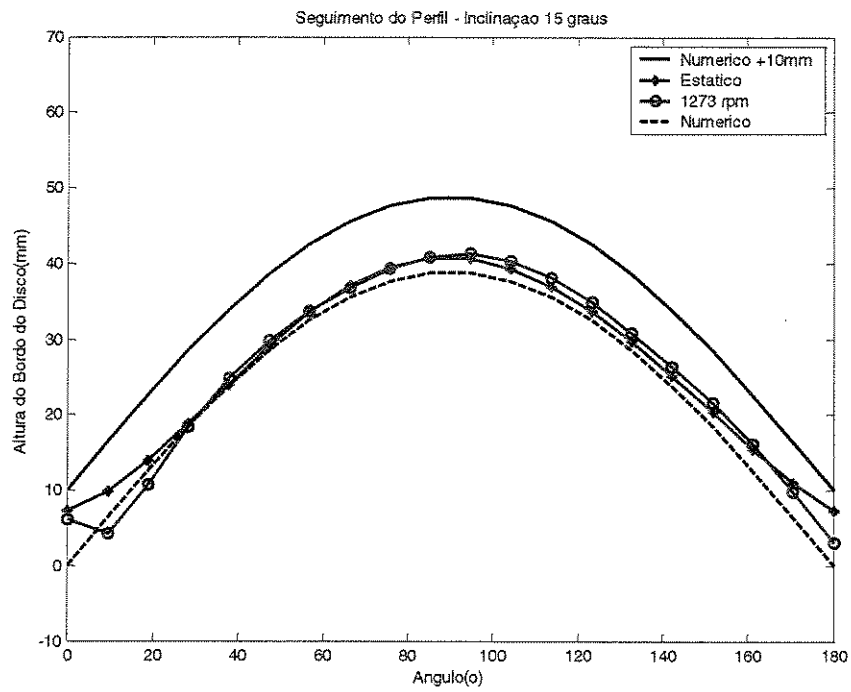


Figura 70. Seguimento do perfil para 15 graus e 1273 rpm ou 20ms^{-1} .

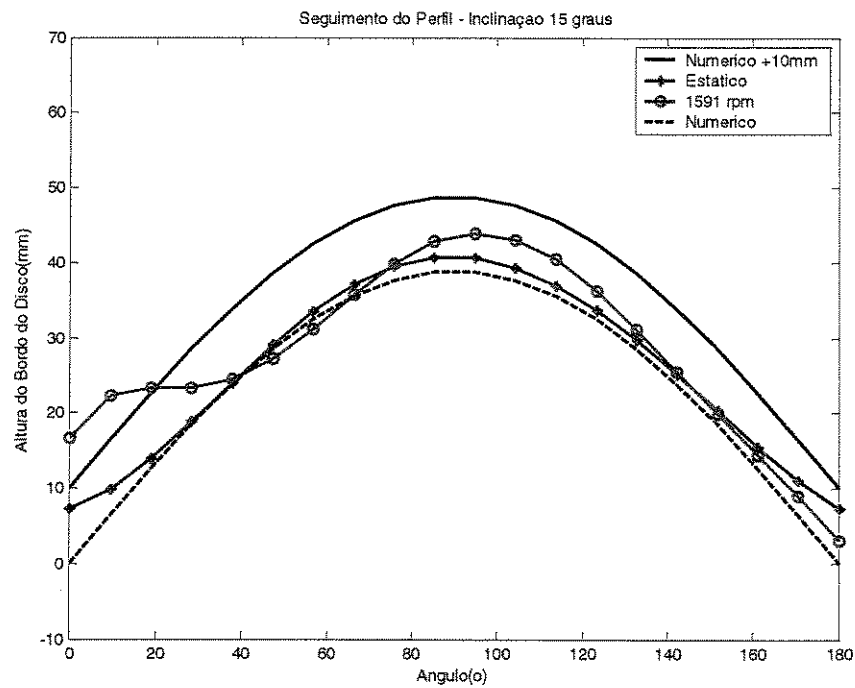


Figura 71. Seguimento do perfil para 15 graus e 1591 rpm ou 25ms^{-1} .

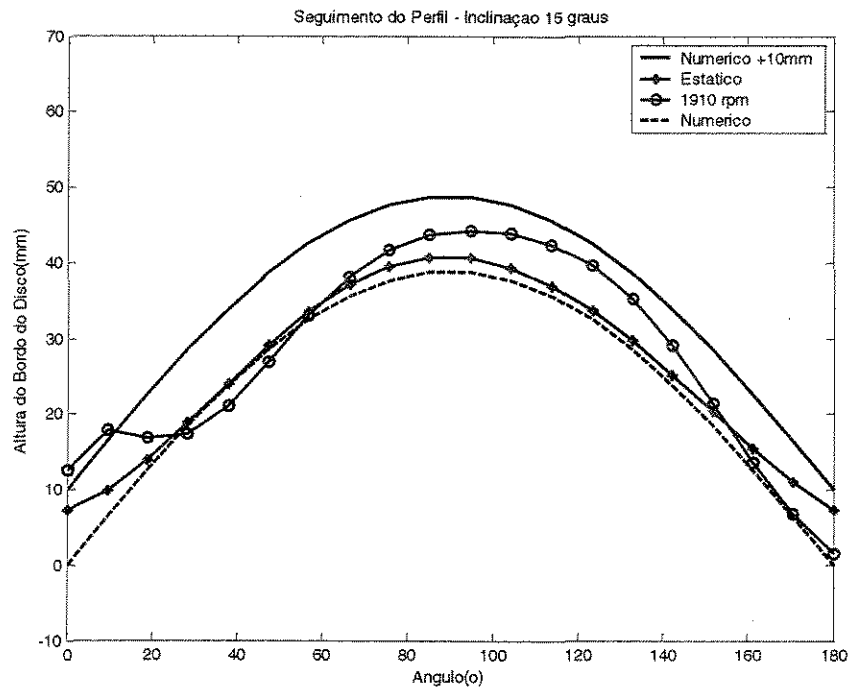


Figura 72. Seguimento do perfil para 15 graus e 1910 rpm ou 30ms^{-1} .

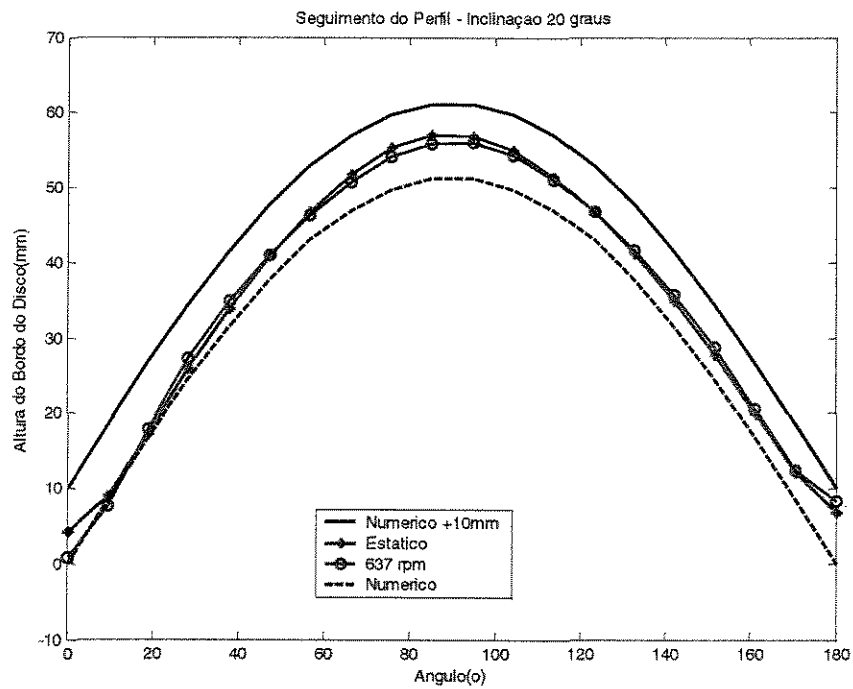


Figura 73. Seguimento do perfil para 20 graus e 637 rpm ou 10ms^{-1} .

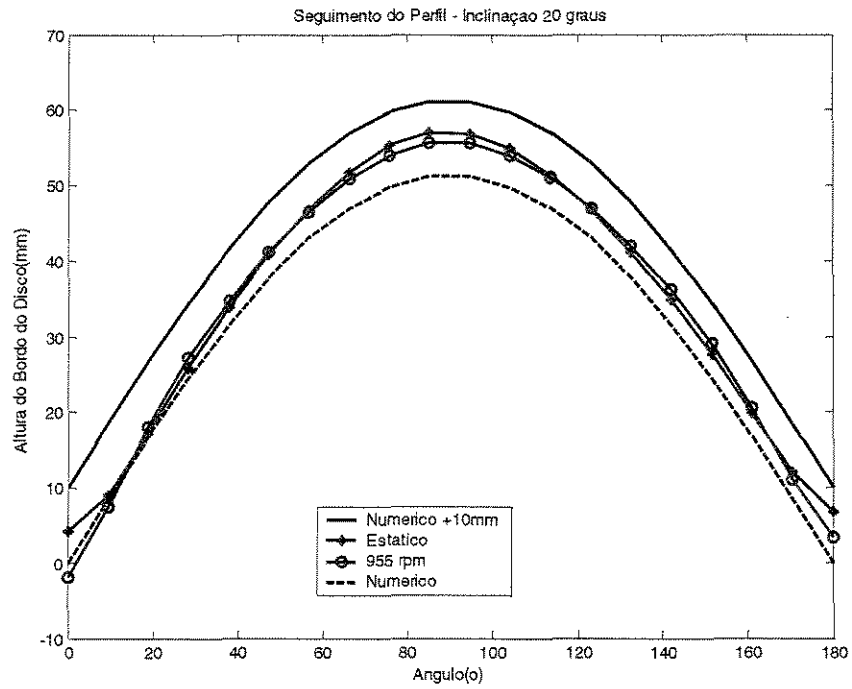


Figura 74. Seguimento do perfil para 20 graus e 955 rpm ou 15ms^{-1} .

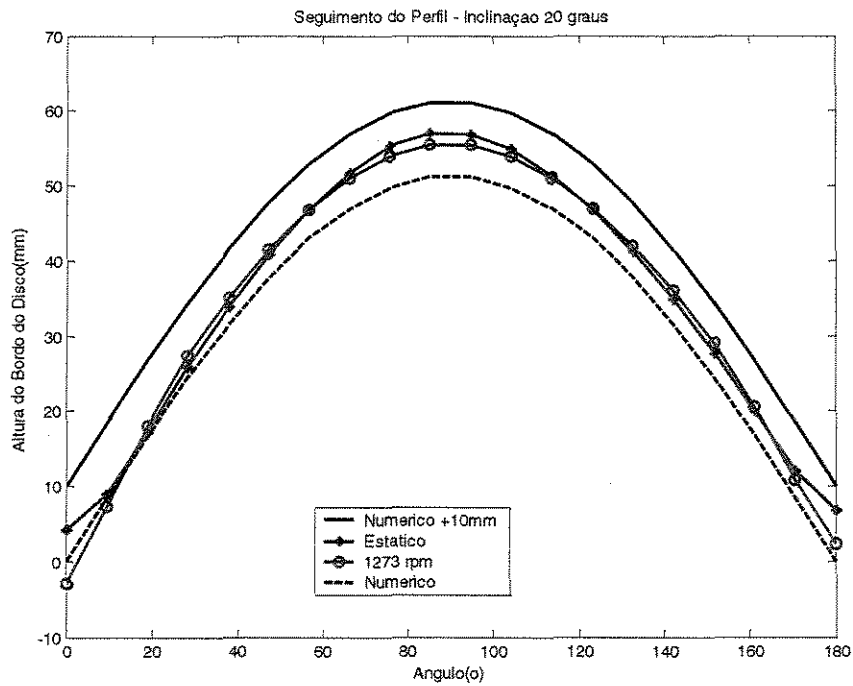


Figura 75. Seguimento do perfil para 20 graus e 1273 rpm ou 20ms^{-1} .

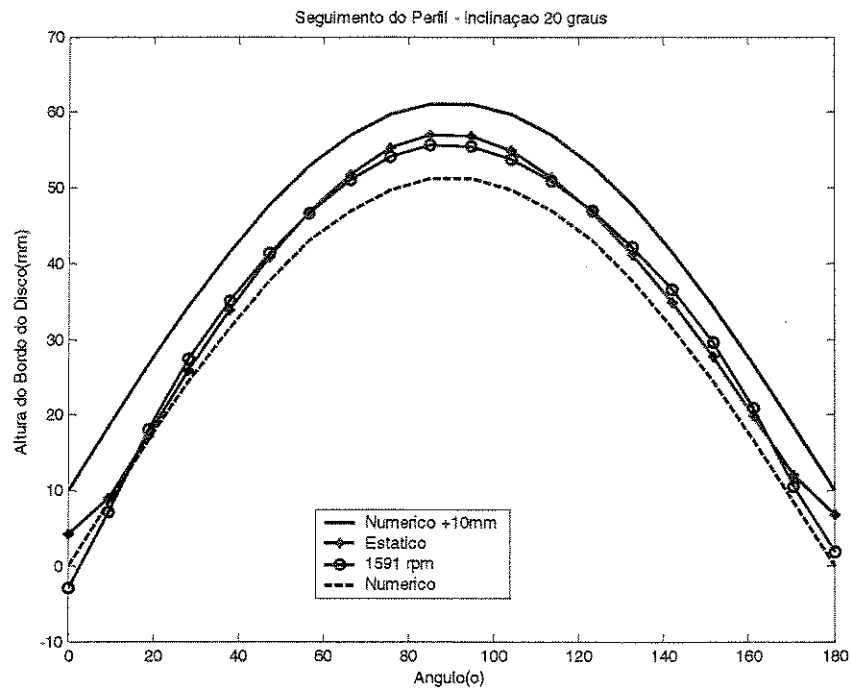


Figura 76. Seguimento do perfil para 20 graus e 1591 rpm ou 25ms^{-1} .

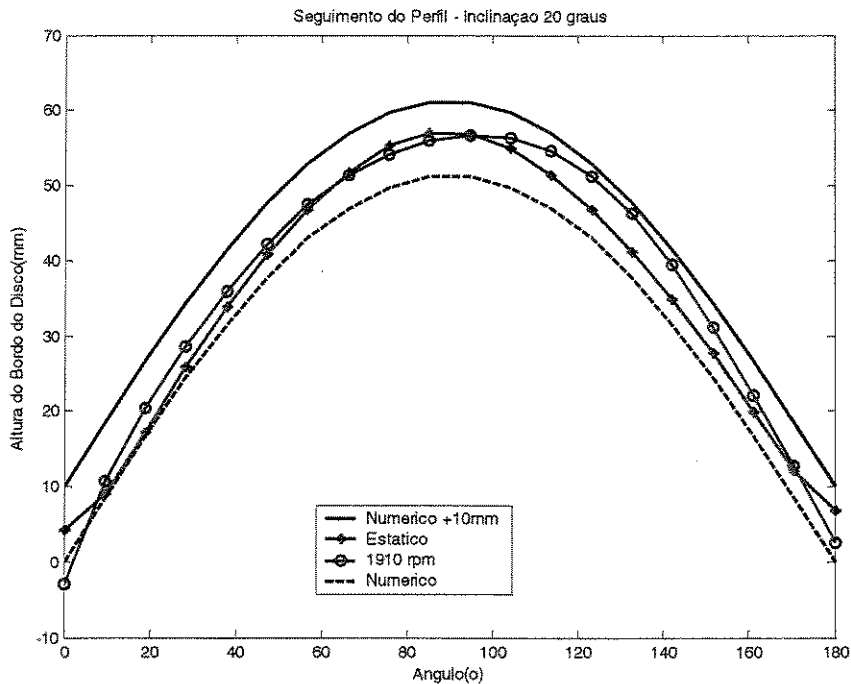


Figura 77. Seguimento do perfil para 20 graus e 1910 rpm ou 30ms^{-1} .

Quadro 18. Desvio padrão das diferenças entre as cotas numéricas e obtidas por *Moiré* (mm).

Inclinação	Regime						
	Estático	637 rpm	955 rpm	1273 rpm	1591 rpm	1910 rpm	Média
05 graus	1,7	2,2	0,4	2,9	3,1	1,6	1,98
10 graus	3,1	2,4	0,8	5,4	4,4	3,9	3,33
15 graus	2,3	2,0	1,0	2,0	5,1	4,1	2,75
20 graus	1,8	1,9	1,9	2,2	2,2	2,9	2,15
Média	2,22	2,12	1,02	3,12	3,7	3,12	2,55

O resumo dos desvios padrão das diferenças entre as cotas do bordo do disco obtidas numericamente e pela técnica de *Moiré*, conforme o quadro 18, mostra um excelente desempenho de varredura do perfil pelo disco flexível, sendo a média dos desvios padrão igual a 2,55mm o que corresponde a menos da metade da espessura do próprio disco.

Os melhores resultados de acompanhamento do perfil foram observados na velocidade de rotação de 955 rpm que equivale a uma velocidade periférica do disco de 15ms^{-1} onde a média dos desvios padrão das diferenças de cota foi de 1,02mm. Também para a velocidade de rotação de 955 rpm, foi observado que a capacidade de acompanhamento do perfil diminuía com o aumento da inclinação, porém, tal comportamento não foi observado para as outras velocidades de acionamento. Exceto para a velocidade de 955 rpm, a capacidade de acompanhamento do perfil diminuiu com o aumento da inclinação de 5 para 10 graus, voltando a crescer de 15 para 20 graus.

Para o regime estático e a velocidade de acionamento de 637 rpm, as maiores diferenças entre as cotas obtidas numericamente e as obtidas por *Moiré* se deram justamente nas proximidades do início e fim do perfil (0^0 e 180^0) e refletem uma tendência de distribuição da tensão de flexão do disco. Esse efeito pode ser observado analisando-se as medidas das cotas obtidas com paquímetro para as mesmas condições, que quando comparadas com *Moiré*, apontam diferenças muito inferiores.

Para as velocidades mais elevadas, foi verificada uma tendência do disco em gerar “pregas” mais elevadas, diminuindo a varredura, sempre na região de entrada do disco no

perfil até o ponto de 345 graus. Também nas velocidades mais elevadas, o ponto de máxima cota do bordo do disco deixava de ocorrer em 0 grau, passando a ocorrer entre 15 e 30 graus.

Nas maiores inclinações do perfil, em função de o setor de 90 a 270 graus do disco se distanciar muito do retículo, chegando em alguns casos a tocar o plano de referência, as franjas formadas não apresentavam boa visibilidade em função da difração da luz branca.

O comportamento do disco no setor de 90 a 270 graus não foi analisado apesar da disponibilidade de informações para praticamente todas as inclinações do perfil e velocidades de rotação do disco, mas de maneira geral, o setor de 90 a 270 graus apresentou uma tendência de se inclinar na direção oposta ao do setor sob a ação do perfil e, para a velocidade de 955 rpm, foi comum a deformação do disco com o formato de uma “sela”.

7. CONCLUSÕES

Baseado nos estudos e resultados apresentados nos capítulos anteriores, é possível concluir que a Técnica de *Moiré* de Sombra representa uma ferramenta acessível capaz de determinar deslocamentos e posições relativas de corpos em movimento que no presente estudo se traduz na capacidade de um disco giratório flexível em acompanhar um dado perfil que simula a ação do solo nas operações de corte basal de plantas.

A precisão apresentada pela Técnica de *Moiré* de Sombra, da ordem de 3mm, é adequada à determinação de deslocamentos e posições relativas de elementos de máquinas agrícolas.

O disco flexível apresentou um elevado desempenho de varredura do perfil utilizado para simular a ação do solo no corte basal de plantas em todas as velocidades de acionamento e ângulos de inclinação testados, sendo estes compatíveis e adequados ao corte de cana-de-açúcar. Para o arranjo experimental utilizado, a melhor performance do disco no seguimento do perfil se deu quando acionado a 955 rpm, o que equivale a uma velocidade periférica de 15ms^{-1} .

Também para o arranjo experimental utilizado, a performance de varredura do disco não foi significativamente influenciada pelos diferentes ângulos de inclinação do perfil utilizados.

Por sua elevada capacidade de seguimento de um perfil que simula a ação do solo, os discos flexíveis constituem-se em uma inédita e grande opção na pesquisa de dispositivos para corte basal de plantas, sendo recomendável a realização de novos estudos com o objetivo de avaliar o seu comportamento dinâmico e estudar seus critérios de resistência, visando aplicações práticas no projeto de cortadores de base.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de aprofundar aos estudos realizados, pode-se sugerir como temas a ser explorados em trabalhos futuros a utilização de outras técnicas da família de *moiré* para determinação de deslocamentos e posições relativas de objetos em ensaios dinâmicos como também a aplicação de métodos para aumento da sensibilidade das técnicas de *moiré*, visando ganhos de precisão em relação à obtida no presente trabalho.

A realização de estudos com diferentes técnicas perfilométricas para aplicação em ensaios dinâmicos, como por exemplo a técnica de projeção de franjas com cores codificadas.

Com relação aos discos flexíveis, podemos sugerir a realização de estudos para a determinação dos modos de vibração e das frequências naturais de discos flexíveis, a modelagem matemática do comportamento dinâmico de discos flexíveis e a realização de estudos dos critérios de resistência dos materiais passíveis de utilização na fabricação de discos flexíveis para aplicação no corte basal de plantas. É também recomendável a realização de estudos da aplicação de discos flexíveis no corte basal de plantas em condições de campo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJOVALIST, A. **Breve guida alla scelta dei metodi de análisis sperimentali delle tensione.** Disponível em: <<http://dmti.unifi.it/aias/articoli/not%2084/ajovalasit.html>>. Acesso em 10/08/1998.

ASSUNDI, A.; YUNG, K.H. Logical moiré and its application. **Experimental Mechanics**, v.31, n.3, p. 236 - 242, set., 1991.

BATOUCHE, M.; BENLAMRI, R.; KOLLADI, M.K. A computer vision system for diagnosing scoliosis using moiré images. **Computation in Biology and Medicine**. v. 26, n.4, p. 339 - 353, mar., 1996.

BOAST, M.M.W. Hydraulic Sensing for Height Control of Ground-following Base Cutter on Mechanical Cane Cutters. **Proceedings of The South African Sugar Cane Technologists Association**. 1986 p. 242 - 246 apud VOLPATO, C.E.S. **Otimização de um Cortador de Base Flutuante para Seguimento do Perfil de Solo em Colhedoras de Cana-de-Açúcar**. 2001 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRAUNBECK, O.A.; MAGALHÃES, P.S.G. Seguimento do perfil do solo no corte e/ou levantamento de produtos agrícolas rasteiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. Vol. 6(1), p. 151 - 158, set. 2002.

CHANG, S.S.; MAZIERO, J.V.G. ;BERNARDI, J.A.; Medição, com pêndulo duplo, da resistência ao corte do colmo de cana-de-açúcar. **Bragantia Revista Científica do Instituto Agrônômico**, Campinas. Vol. 41 p. 12 - 19 mar. 1982.

CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. 2nd . ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 405p.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. 2nd ed. New York: McGraw – Hill. 1978. 571p.

DANTU, P. Extension of the moiré method to thermal problems. **Experimental Mechanics** v.4, n. 3 p. 64 – 69. 1964 apud CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. 2nd . ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 405p.

DIRKX, J. J. J.; DECRAEMER, W. F. Automatic calibration method for phase shift shadow moiré interferometry. **Applied Optics**. Washington. v.29, n.10, p.1474 - 1476, Abr., 1990.

DURELLI, A. J.; PARKS, V. J. **Moiré analysis of strain**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970. 399 p.

GARSON, C. A. Control of harvester basecutter height. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**. 1992. p. 156 - 162 apud VOLPATO, C.E.S. **Otimização de um Cortador de Base Flutuante para Seguimento do Perfil de Solo em Colhedoras de Cana-de-Açúcar**. 2001 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GARSON, C. A.; ARMSTRONG, M. Ultrasonic base cutter height control: a report on 1992 season experiments. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**. 1993. p. 52 - 59 apud VOLPATO, C.E.S. **Otimização de um Cortador de Base Flutuante para Seguimento do Perfil de Solo em Colhedoras de Cana-de-Açúcar**. 2001 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GASVIK, K. J. Moiré techniques by means of digital image processing. **Applied Optics**. Washington. v.22, n.23, p.3543 - 3548, set., 1983.

GUPTA, C.P.; ODUORI, F.M. Design of the revolving knife-type sugarcane basecutter. **American Society of Agriculture Engineers**. Vol. 35(6): Nov/Dec 1992. p. 17417 - 17420.

KATSUKI, T.; GOTO, M.; KAWANO, Y.; TASHIRO, H. Quantification of symmetry of the nose using an analysis of Moiré photographs of a face. **Optical in Biomedical Sciences: Spring Series in Optical Science**. ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v. 20, p. 267 - 269, 1982.

KROES, S.; HARRIS, H.D. Cutting forces and energy during an impact cut of sugarcane stalks. In: **CIGR Agriculture Engineering Conference**, Madrid, 1996. 96A - 035.

KROES, S.; Harris, H.D. Effects of cane harvester basecutter parameters on the quality of cut. **Proceedings of Australian Society of Sugar cane Technologists**. 1996a. p. 169 - 177.

LINO, A. C. L. **Técnica óptica de moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 2002. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LOPES, G. T. **Proposta de um controlador ótimo de altura da plataforma de corte de colhedoras**. 2000. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

MAZZETI FILHO, V. et al. Application of *Moiré* technique in the stress Distribution mapping of circular rotors. In : **International Congress on Information Technology in Agriculture, Food and Environment**. 2003, Izmir Turkey. Proceedings of International Congress on Information Technology in Agriculture, Food and Environment. Izmir: Ege University Press. October 7-10, 2003. p. 594 - 598.

MEADOWS, D. M.; JONHSON, W.O. & ALLEN, J. B. Generation of surface contours by moiré patterns. **Applied Optics**. Washington. v.9, n.4, p. 942 - 947, mar., 1970.

MOORE, D. T.; TRUAX, B.E. Phase-locked moiré fringe analysis for automatic contouring of diffuse surface. **Applied Optics**. Washington. v.18, n.4, p. 91 - 96, mar., 1979.

MULOT, M. Application of moiré to the study of mica deformation. **Rev. D'Optique**. Washington. v.4, p. 252-259, mai., 1925 apud SCIAMMARELLA, C. A. The moiré method – A review. **Experimental Mechanics**. v.44, n.8, p. 418 - 433, nov., 1982.

MUSUMECI, P.C. & BITMEAD, R.R. Basecutter Height Sensing on Cane Harvester. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**. 1981. p. 333 - 338. apud VOLPATO, C.E.S. **Otimização de um Cortador de Base Flutuante para Seguimento do Perfil de Solo em Colhedoras de Cana-de-Açúcar**. 2001 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - INNOVATION DESERVING EXPLORATORY ANALYSIS PROGRAM, 2000. **Surface condition assessment and profiler system for pavements using shadow moiré interferometry**. apud LINO, A. C. L. **Técnica óptica de moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 2002. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NEVES, J.L.M. et al. Comparative Testing of a floating and a conventional fixed base cutter. **Society of Sugar Cane Technologists**. 2001 Vol. 24: p. 257 - 262.

NEUGEBAUER, H.; WINDISCHBAUER, G. Moiré topography in scoliosis research. **Optical in Biomedical Sciences: Spring Series in Optical Science**. ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v. 20, p. 250 - 253, 1982.

NISHIJIMA, Y. Moiré patterns: Their application to refractive index and refractive index gradient measurements. **Journal of the Optical Society of America**. Washington. v.54, n.1, p. 1 - 5, 1964.

ODUORI, F.M.; GUPTA, C.P.; SAKAI, J. Kinematics of revolving-knife disk-type sugarcane basecutter – **Agriculture Mechanization in Ásia, Africa and Latin América**. Vol. 23(4) 1992 p. 9 - 15.

OSTER, G.; NISHIJIMA, Y. Moiré patterns. **Scientific American Resource Library: Readings in the Physics Sciences and Technology**. Washington. v.3. Offprints 291-326. p. 54 - 63. 1964.

OSTER, G.; WASSERMAN, M.; ZWERLIG, C. Theoretical Interpretation of Moiré patterns. **Journal Optical Society of America**. Washington. v.54, n.2, p. 169 - 175, 1964.

POST, D.; HAN, B.; IFJU, P. **High Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials**. New York, Spring-Verlag. 1994.

RAFULL, L.Z.L. & ALVAREZ, M.D. Evaluación de um mecanismo hidraulico para la regulación de la altura de corte de cosechadoras cañeras. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuárias**. Vol 8 . p. 23 - 28. 1999 apud VOLPATO, C.E.S. **Otimização de um Cortador de Base Flutuante para Seguimento do Perfil de Solo em Colhedoras de Cana-de-Açúcar**. 2001 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RAMOS, P. **Agroindústria Canavieira e Propriedade Fundiária no Brasil**. São Paulo: Hucitec, 1999.

RAYLEIGH, **Phil. Mag.** v 47, p.81 e193, 1874 apud SCIAMMARELLA, C. A. The moiré method – A review. **Experimental Mechanics**. v.44, n.8, p. 418 - 433, nov., 1982.

RIDGE, D.R.; DICK, R.G. Current research on green cane harvesting and dirt rejection by harvesters. **Proceedings of Australian Society of Sugarcane Techonologists**, Mackay, vol. 10, 1988, p. 19 - 25.

RILEY, W.F.; DURELLI, A.J. Application of moiré methods to the determination of transient stress and strain distributions. **Journal of Applied Mechanics**. v.29, n.4, 1962 apud CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge, Cambridge University Press, 405 p. 1998.

RÍPOLI, T.C. Considerações sobre colheita mecânica da cana-de-açúcar: **Revista de Mecanização Rural**. São Paulo, vol..1, nº4, 1981, p.31 - 35.

SHAPIRA, I.; VOLOSHIN, A. S. fractional moiré fringe analysis by optimization. **Optical Engineering**. v.31, n.4, p. 838 - 845. jan. 1992.

SU, X.; CHEN, W. Fourier transform profilometry: a review. **Optical and Lasers in Engineering**. v.35, p. 263 - 284. 2001.

SCIAMMARELLA, C. A. The moiré method – A review. **Experimental Mechanics**. v.44, n.8, p. 418 - 433, nov., 1982.

SOILLE, P. Morphological phase unwrapping. **Optical and Lasers in Engineering**. v.32, p. 339 - 352, jan., 2000.

TAKASAKI, H. Moiré topography. **Applied Optics**. Washington. v.9, n.6, p. 1457 - 1462, out., 1970.

TAKASAKI, H. Moiré topography. **Applied Optics**. Washington. v.12, n.4, p. 845 - 850, abr., 1973.

TAKEDA, M; MUTOH, K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. **Applied Optics**. Washington. v.22 n.24 nov. 1983.

THEOCARIS, P.S. **Moiré fringes in strain analysis**. New York: Pergamon Press, 1969 apud CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**., Cambridge University Press, Cambridge, 405p. 1998.

TOLLENAAR, D. **Moiré Interferentieverschijnselen bij rasterdruk**, Amesterdam Instituut voor Grafische Technick. 1945. apud CLOUD, G. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge University Press, Cambridge. 405p. 1998.

TRINDADE, L.F.M. **Perspectiva de Expansão da oferta de Eletricidade no estado de São Paulo Via Fontes Renováveis e Não Renováveis de Enegia**. 1997 196p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VEIGA FILHO, A. A. **Evolução da Mecanização do Corte da Cana-de-Açúcar em São Paulo, 1988/89-1999/00**. Instituto de Economia Agrícola da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo 2002.

VOLPATO, C.E.S. **Otimização de um Cortador de Base Flutuante para Seguimento do Perfil de Solo em Colhedoras de Cana-de-Açúcar**. 2001 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WANG, Y.; HASSELL. P. **Measurement of thermally induced warpage of BGA packages/substrates using phase-stepping shadow**. Disponível em: <http://www.warpfinder.com/IPC.pdf>. Acesso em 10/07/2000.

WANG, Y. **Shadow Moiré sensitivity increase by fringe shifting: phase-stepping**. apud LINO, A. C. L. **Técnica óptica de moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 2002. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WELLER, R; SHEPARD, B. M. Displacement measurement by mechanical interferometry. Preceedings of SESA. Vol. VI n1, p 35 – 38. 1948, apud DALLY, J. W.; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. 2nd ed. New York. McGraw – Hill. 1978. 571p.

WHITEHOUSE, D.J. **Handbook of surface metrology**. Bristol, IOP Publishing, 1994.

WILLMOT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M., KLINK, D.R. Statistics for the evaluation and comparison of models apud LINO, A. C. L. **Técnica óptica de moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 2002. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WINDISCHBAUER, G. Survey on application of Moiré-techniques in medicine and biology. In: **Optical in Biomedical Sciences: Spring Series in Optical Science**. ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v.20, p. 245 - 249, 1982.

ZWEMER, D.; HASSELL, P.; MAZEIKA, W.; PETERSKI, L.; HOLMES, R. **Shadow moiré based printed wiring board flatness inspection**. Disponível em: <http://www.warpfinder.com/IPC.pdf>. Acesso em 10/07/2002.

ZYWANG, W. **RISING-SUN *MOIRÉ* SOFTWARE**. 2001 Disponível em:
http://www.glue.umd.edu/~zywang/download_moire.htm>. Acesso em 10/09/2002.